资源环境数学模型手册

主编　岳天祥

科学出版社

中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-308)
国家重点基础研究发展“973”规划项目(2002CB412500)

资源环境数学模型手册

学术指导　陈述彭
主　　编　岳天祥

科学出版社
北京

内 容 简 介

本书在全面总结和分析国内外资源环境领域主要期刊内容的基础上，选编了比较实用和有科学价值的数学模型和定量指标的精髓部分。本书中数学模型和定量指标共有3055组，其中包括地球信息科学类771组、自然地理学类674组、人文地理学类415组、生态学类1195组。在选编过程中，对书中数学模型和定量指标的错误之处均进行了严格修正。

本书有很高的理论价值和实用价值，不仅可作为地理学、生态学、应用数学、气象学、地质学、经济学等资源环境领域的相关专业和计算机软件等专业科研工作者的工具书，而且可作为高校有关专业教学的课外辅导书和博士生、硕士生、大学生撰写学位论文的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

资源环境数学模型手册/岳天祥主编. —北京：科学出版社，2003
ISBN 7-03-011436-1

Ⅰ.资… Ⅱ.岳… Ⅲ.自然资源-环境数学-数学模型-手册 Ⅳ.X11-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第032989号

策划编辑：胡晓春/文案编辑：彭 斌 姚 晖/责任校对：宋玲玲
责任印制：钱玉芬/封面设计：槐寿明

科学出版社 出版
北京东黄城根北街16号
邮政编码 100717
http://www.sciencep.com
双青印刷厂 印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销
科学出版社编务公司编辑制作

2003年10月第一版 开本：A4(890×1240)
2003年10月第一次印刷 印张：58 3/4
印数：1—3000 字数：1 941 000

定价：200.00元

(如有印装质量问题，我社负责调换〈新欣〉)

序　言

中国科学院资源与环境信息系统国家重点实验室创新基地研究员岳天祥博士，以其深厚的数学造诣，继查询、清理《地理学报》有关地学数学模型试点工作之后，又经过多年的积累，淘选和查证、汇编出版这部《资源环境数学模型手册》。这是对近百年来有关应用于地学领域的数学模型的一次大盘点、大梳理。去粗取精、去伪取真，逐一地检验这些模型推理的逻辑性，保存那些在数学上可以成立、在地学上确有科学意义的部分。集腋成裘，打造一个能为地学、资源与环境科学公众服务的“数学工具箱”，减少许多低级的重复劳动，特别是节约青年学子宝贵的青春年华，可以说是功在当代、利在千秋的一项善举。对于编纂诸如此类科普读物和工具用书的科学家们的这种自我牺牲、无私奉献精神，我是素来非常钦佩和崇敬的。

模型是人类的数学思维方式之一。没有数学模型，人们辛勤获取的大量观测数据，就像一盘散沙，找不出其中哪些是璀璨的金粒，哪些能够显示出本质性的规律，从中提取有效的信息，升华成为科学知识。特别是在地球科学领域，由于自然界计量具有许多当前科学水平还难以理解的不确定性，并不是所有的数学模型都能作为物理模型，也不是所有的物理模型都是地学模型。例如，许多数学模型还需要有特定的区域参数的订正，才能因地制宜，逼近自然界的区域分异规律。

早在 19 世纪就创立了计量地理学，运用数学方法和模型，进行资源与环境领域中有关区位问题的空间分析。对大气环流、地表坡面发育等自然过程的数学表述，也曾取得了一定的进展，但当时缺乏足够的数据库的支持和高性能的电脑工具，巧妇难为无米之炊，难以为继，曾被社会讥笑为“数字游戏”。但在当今航天时代与信息社会里，大气、海洋、资源、环境卫星系列已进入业务运行状态，定位的、自动的对地观测台站网络，日新月异地进步，深潜机器人、大洋深钻、登月舱、载人飞船、宇宙空间站等超越人类生存极限的平台，夜以继日地工作。海量数据，极大丰富。如果没有数学模型加以梳理，进行深层次的数据挖掘，观测数据愈多，就会成为“信息爆炸”，科学数据将会货弃于地，成为垃圾。

我国地学界运用数学模型取得了许多辉煌的成就。例如，大气、海洋和地震的数值预报，水文测算，人口控制，主要粮食作物估产、风险评估、预警等诸多领域，所创立的或改进的一系列统计学模型、空间分析模型与动力学模型，都受到了国际同行的高度赞誉。20 世纪末，数学地质找矿、生态环境评估、精确农业等新兴领域应运而生。在“数字地球”战略的大潮中，数字省区、数字城市、数字社区乃至智能大厦的涌现，它们对数学模型的应用需求，就更加广泛而迫切了。

读者如果能从这部手册中去查找到自己认为较好的模型，结合中国复杂的地理环境、采用适当的区域参数、加以改造、加权、推陈出新，实现国际模型的本土化，自然令人欣慰。更重要的是希望读者经过检索、查询，发现天外有天，原来还有如此之多的“空白”，英雄大

有用武之地！例如，从这部手册收集到的数学模型中，我们可以看到：绝大部分属于数理统计模型，或者是经验模型。基于地学机制性的模型并不很多，属于图形思维范畴的模型、涉及分形分维那样能揭示自然界微妙的艺术造型法则的模型更属凤毛麟角。希望读者们勇敢地站在数学巨人的肩上，去开拓创新，学习生命科学家们建立基因图谱的务实求真的科学精神，在地球系统科学的宏观世界，奇迹般地创造出大量空间分析过程反演的新模型，让数学模型绽开更加绚丽的奇葩！加以验证并推广应用，为地区经济持续发展和全面建设小康社会做出新贡献。

陈述彭

2003 年 2 月 14 日

前　言

近几个世纪以来，为了研究和解决世界所面临的重大资源与环境问题，中外有关学者已经建立了大量的模型，这些模型是科学家们在长期的研究中形成的科学知识和经验的结晶。然而，这些宝贵知识的大部分常常被闲置在许多不同的期刊、著作、手册、项目报告和内部论文中，很难得到充分的运用。1998 年，陈述彭院士指出，为了充分高效地利用已有的知识和模型、开发必要的模型，急需将已有模型整理汇编成一本便于使用的《资源环境数学模型手册》。

自 1998 年以来，在陈述彭院士的指导下，我们对发表在国内外资源环境领域主要期刊上的有关模型和定量指标进行了全面的分析和总结，选编了我们认为既实用又有理论价值的 3055 组模型和定量指标，形成了《资源环境数学模型手册》，该手册由地球信息科学、自然地理学、人文地理学、生态学和几个重要的综合模型五大部分组成。

《资源环境数学模型手册》的出版有利于模型资源的高效、合理利用，将为模型研究领域带来以下益处：①可减少模型在其有效范围以外的滥用现象；②可减少不必要的模型重复构建所造成的时间和财力浪费；③可明确模型研究领域需填补的空白，使模型构建人员有的放矢；④有利于具有同一资源环境内涵，而有不同数学表达的模型的比较选择；⑤有利于模型一般模式的识别。

模型是分析资源环境问题的有用工具，但一个单独的模型远不能满足需要，解决复杂系统问题需要各种互补模型的集成，需要开发模型库管理系统。模型库管理系统是一个年轻的领域，理论基础还不够成熟，有许多问题需要深入研究。例如，模型库管理系统可视化、信息安全、语言标准化、实现模型库系统与数据库系统有效集成的标准通用数据接口等理论问题。模型库管理系统的主要功能包括：①允许用户在已有模块的基础上产生新的模型；②提供多种模型联结机制，以便序列处理和数据交换；③允许用户为其特殊需要修改已有模型；④具有存储、管理、使用和操作模型的规则系统；⑤具有存储模型的分类系统和组织方案；⑥具有类似数据库管理系统的所有功能(例如，运行、存储、检索、删除和联结等)；⑦具有模型合理性和灵敏性分析功能。模型库管理系统是《资源环境数学模型手册》进一步发展的必然产物。

将定量化模型应用于决策问题是辅助决策支持系统的最原始概念。辅助决策的概念演化到今天，其原始概念已得到了许多扩展，它的基本内容已发展为以模型库为核心的模型库管理系统、数据库管理系统和用户友好界面的结合。对不同的辅助决策支持系统，其基本模型的个数、大小和复杂性有很大的差异。为了应变各种辅助决策支持系统的需要，需建立有效的模型库管理系统。模型库管理系统是辅助决策支持系统的核心，《资源环境数学模型手册》是各种辅助决策支持系统模型库的基础。

近 5 年来，在《资源环境数学模型手册》的编写过程中，我们自始至终得到了陈述彭院

士的指导和关怀，资源与环境信息系统国家重点实验室的资源环境模型与系统模拟研究小组全体成员付出了艰苦的劳动。在此向他们以及给予过指导和帮助的前辈、同仁们表示诚挚的谢意。

岳天祥

2003年2月于北京

目 录

第一篇 地球信息科学

第一章 遥感成像与信息传输机制 3

植被冠层的热辐射数值方程 3

观测角度对植物冠层温度的辐射测量影响的计算模型 3

林冠中光的透射和反射分析公式 3

微波雷达对玉米和高粱的冠层水分、叶面积指数和干重的响应模型 4

基于卫星微波辐射计的降雨率探测模型 4

消除地形影响的方法 4

辐射随海拔高度的变化模型 5

反射率计算公式 5

微波亮度温度数据的大气校正模型 5

利用卫星热红外数据估计表面温度的计算模型 5

雪累积率的计算方法 6

地面长波辐射经验计算公式 6

大气浑浊度分析公式 6

卫星多谱段扫描图像 MS 的定位计算公式 7

半球面反射系数计算公式 7

热红外扫描影像分析公式 7

植被雷达后向散射与辐射发射的回归模型 7

叶片尺寸对玉米微波后向散射影响的估算模型 8

冠层反射系数，光合作用和蒸发(Ⅱ)之间的线性相互依赖关系模型 8

基于多重散射方程解析解的冠层反射模型 8

矿物和岩石的介电性模型 9

红外辐射定律及红外发射率 9

仿射变换的数学模型 10

漫反射率的估算模型 10

辐射的物理模型 10

大气中水蒸气效应校正的线性关系模型 10

雷达反射率与降雨强度的关系模型 10

基于多重散射 LOWTRAN 码的多光谱传感器数据模拟模型 10

从空间测量陆面温度的可行性物理基础 10

辐射输运的数值模型 11

坡地辐射场研究模型 11

影像类型界线转绘方法 12

原始的热模型 12

裸地双向反射系数预测的物理模型 13

灌木草原生态系统中土壤与 *Artemisia tridentata* 的红外发射率及相应温度校正模型 13

反射系数因子(*RF*)模型 13

光散射模型 13

植物冠层中的传输方程及其蒙特卡洛方法 13

HRV 数字计数到反射系数的转换模型 14

从兰勃曲线值得到的光学厚度成分修正估计模型 14

热红外辐射解释模型 14

不均匀方位角分布的冠层参数反演推理模型 15

双参考温度自动增益补偿微波辐射计的灵敏度模型 15

递归计算模型 15

关于波长 λ 的 IFOV 散射截面，总的地面 IFOV 的反射功率模型 16

农作物残余物的辐射通量模型 16

Kubelka-Munk 荧光模型(KMF) 16

卫星图像中大气影响的消除模型 16

农作物反射光的偏振度计算模型 17

利用紫外线反射率通过卫星观测估计入射光合作用有效辐射模型 17

遥感研究的理论模式 17

底片上所得某光谱波段和该光谱波段曝光量之间的关系模型 17

海冰微波辐射的数值模式 17

成像光谱仪数据分析方法 18

多层随机介质的辐射传输方程和边界条件模型 18

动态定位技术的基本方程 18

频域误差改善方法 18

农作物生物量和水分状况的微波植被指数探测模型 18

规则丛生冠层的半球面辐射及直接辐射通量模型 19

测量发射率的双温度法 19

叶片的光合作用和气孔导度估算模型 19

从 POLDER 在海洋上空的观测值获取光学及物理参数的解析模型 20

正射影像负片的编制模型 20

TM 图像地物颜色的定量预测及标准化控制模型 20

不连续植被二向性反射的几何光学与辐射传输一体化综合模型……20
海岸线长度模型……21
近飞轨迹模型……21
AVHRR 图像大气影响校正模型……21
多次散射及热红外辐射计算……21
二维 RGS 法模型……22
CCD 相机数据的系统几何校正模型……22
多成分植被冠层的双向反射模型……22
土壤反射率可给模型……22
锥形树干模型……22
有效辐射计算的修正模型……23
双向反射测量值的数学模型……23
AVHRR 的双向反射效应及其复合的数学模型……23
一维离散坐标冠层反射模型……23
表面温度与蒸散量的计算模型……24
估计植被冠层有效衰减系数的微波传输模型……24
辐射灰度纠正模型……24
调频三角波的频率模型……24
自然光辐射各分量卫星遥感图像的计算机生成原理与方法的数学模型……24
中分辨率机载海洋雷达高度计系统分析及接收系统的研制模型……25
土壤水分和植被生物量的获取模型……25
一个新的冠层反射模型……26
从卫星观测获取地表长波通量的数学模型……26
卫星获取表面短波辐射的数学模型……27
地球表面有效光合作用辐射的估测模型……27
辐射传输方程……27
数值模拟结果——σ-e 相关关系模型……27
成像光谱图像处理中的光谱吸收指数及吸收鉴别模型……27
水汽透过率及其密度计算……28
BRDF 模型……28
薄云成像模型……28
热象仪测量原理……28
生物量密度-反射散射关系模型……28
空间波与长试样法测量介电常数的模型……29
太阳直射辐射模型……29
湿地植被成像光谱的分析模型……29
干涉雷达成像原理和处理方法……29
能量平衡方程的化简及热惯量求解模型……29
卫星传感器接收的地表亮温模型……30
大气交叉辐射影响模型……30
高度计系统分析与分裂门跟踪及全程搜索模型……30
海洋雷达高度计测高原理及关键技术……30
大气地表辐射传输模型……30
辐射传输及大气光学参量测量模型……30
INSAR 干涉图的相位误差的概率密度函数……31
后向散射模型……31
太阳光变角入射时辐射计热力学微分方程……31
双向反射分布函数模型……31
真实蒸散量计算模型……31
总的辐射计算公式……32
地表温度与比辐射率的物理方程……32
地面目标反射率模型……32
反演方程和数值模拟模型……32
频率响应及一维原形滤波器的设计模型……33
机载激光扫描测距仪及其性能分析模型……33
逆向辐射的机制及其对定标的影响模型……33
任意地面点的成像方程……33
关于潜热通量、显热通量、及光合作用率估计的一些半经验性模型……33
森林反射模型……34
海洋表面油膜的 SAR 检测机制……35
微波辐射计系统模型……35
高度计系统设计及测高精度分析模型……35
海水微波辐射传输模式……36
互补相关方程……36
海洋水 CCD 成像仪输出模型……36
热辐射传输方程……36
高度计海面风速反演的模式函数……36
PHI 成像光谱图像反射率转换模型……37
树冠层中的辐射传输模型……37
一维辐射传输方程……37
通过机载散射仪的土壤水分模型……37
无限反射公式……38
星载 SAR 的工作原理及其系统设计模型……38
陆面温度反演算法……38
星载 SAR 水下地形和水深遥感的仿真模型……39
辐射特性测量原理及数据处理模型……39
总光合作用估计模型……40
机载热红外扫描仪的信噪比分析模型……40
星载 SAR 图像的两种实用化 R-D 定位模型……41

第二章 地物波谱与频谱特征……42

多光谱摄影原理……42
照像物镜所成像的照度模型和乳胶在正常曝光区段密度模型……42
漫反射率模型……42
利用卫星辨识高于像素分辨率的地表温度场分析模型……42
空载雷达对土壤水分的响应模型……43
类内与类间离散性比值模型……43

归一化亮度温度定义模型 43
城市区域热红外成像发射率变化的测算模型 43
可见光的反射和偏振百分比计算公式 43
通过红外测温法测量湿度的测算模型 43
水稻含水率及其鉴别指数模型 44
土地利用的聚类分析模型 44
基于 AVHRR 卫星图像的植被分类模型 44
玉米与高粱的多成分模型 44
绿度计算模型 45
植物水分胁迫的微波遥感模型 45
作物绿度模式及其与四波段平均反射率的关系模型 45
水资源联合利用的合理性分析模型 45
混合影响分析(ANOVA) 模型 45
土壤水分影响的观测模型 46
玉米冠层吸收光合作用有效辐射的光谱估计模型 46
地面上总生物量计算公式 46
辐照光谱计算模型 46
有效反射率的计算模型 46
地面温度的修正算法 46
空间自相关模型 47
森林群丛在 X-, C-及 L-波段的后向散射及衰减特性的测量模型 47
大气校正模型 47
主成分分析方法 47
叶绿素浓度的估算模型 47
卫星监测海洋的理论模型 47
冠层结构指数的计算模型 48
加权差植被指数 48
叶片水分含量变化探测模型 48
二向性反射和方向波谱特征模型 48
植被介质的多组分多层微波后向散射模型 49
I_{ndv} 相对于像素内变化的变化率计算公式 49
玉米光谱-生物物理学数据的多地点分析模型 49
反射光的偏振度模型 49
叶的光学特性谱 PROSPECT 模型 49
辐射亮度温度模型 50
通过谱分解技术对土壤生物物理特性的估算模型 50
水分位势和相对水分含量的分析模型 50
均一分布的草叶层的后向散射模型 50
稻谷产量的回归方程 51
喊衰老指数模型 51
利用 NOAA-11 AVHRR 波段 4 和 5 对地表温度的大气校正模型 51
理论模式均匀双层介质的亮温模型 51
地物光谱波形分析模型 51
辐射量及植物量的光谱估计模型 52
反射谱的比值分析(RARS)模型 52
空间属性提取算法的相关模型 52
SOILSPECT 模型 53
光谱-生物物理学数据的多地点分析模型 53
波段 6 的假定发射模型 53
农作物植被层的平均介电常数 53
多光谱数据与地面光谱数据之间的相关模型 53
光谱波形分析法的数学原理 54
无云的大气-海洋系统反射率解析模型 54
谱混合分析模型 54
用 AVHRR 数据确定地表温度和发射率的可行性论证模型 54
光截留和生物量计算模型 55
PROSPECT+SAIL 冠层反射模型 55
空间域内的总能量模型 55
方向性孔隙率与日截留效率的计算模型 55
多谱段双向反射模型 55
基于 AVIRIS 观测数据的冠层生物化学估计的多变量分析模型 56
粗糙表面的非线性混合谱段模型 56
土壤校正植被指数的修正模型 56
冠层反射率对叶片反射率的敏感度计算公式 56
植被指数/温度(VIT)梯形模型 56
多谱段卫星观察的协作模型 57
农作物参数估计模型 57
地球表面热红外遥感观测的信息提取算法 57
植被吸收的 PAR 双向反射估计模型 58
反射波谱线性拟合模型 58
叶面积指数与反射率的关系模型 58
土壤湿度和表面粗糙度的主动式/被动式微波数据估计模型 59
松毛虫危害的光谱特征与虫害早期探测模式 59
植被指数 59
标准化水分差异指数 59
土壤校正植被指数与大气校正指数模型 59
小麦的雷达信号描述模型 60
混合光谱分析模型 60
KT 变换 60
火灾后生态系统恢复速率的模拟模型 60
水色与水体成分的吸收和散射的关系模型 60
水体各成分的后向散射模型 61
在 3.75 μm 波段反射信号的 AVHRR 数据恢复模型 61
水蒸气吸收的影响模型 61
地表温度和发射率的热红外多波段数据恢复模型 61
LIBERTY——叶片生物化学浓度对反射谱的影响模型 62

土壤表面水分指数衰减函数……62
AVHRR 波段 3 的反射率计算模型……62
森林地面枯落层的散射模型……62
植被指数的计算……63
定量遥测污染云团光谱模型……63
遥感光谱信号模型……63
土地覆盖变化分析公式……63
地表温度的精确性评估模型……63
森林覆盖变化探测的相对校准模型……64
冠层叶绿素浓度的机载波谱信号估计模型……65
线性谱混合模型(LSMM)……65
叶片光学特性随机性模型的修订模式……65
FLIM 模型……66
温度无关的谱指数……66
利用 C 波段雷达数据监视农作物生物量的方法……66
增强植被指数(I_{ev})复合方法……66
机载 ASAS 高光谱 BRDF 数据的各向异性因子的分类模型……67
协方差-方差比模型……67
露水形成的最大速率及其形成总量的计算公式……67
岩石试验室反射光谱的相似系数聚类分析模型……67
X 波段散射计辐射计组合系统理论分析模型……67
LAI 获取的短波红外修正模型……68
小波分析函数……68
森林的直向多谱段反射模型……68
陆地表面发射率的计算模型……68
热发射率对比方法……69
雪水当量的计算模型……69
红光-近红外反射系数空间中的植被等值线分析模型……69
植被-温度指数模型……69
叶片尺度的测量及模拟模型……70
植被光谱的光学-生物物理关系模型……70
水面反射率 R_W 模型……70
宽波段热红外方向性辐射建模……70
植被群体反射光谱及其导数光谱与叶绿素密度的相关分析模型……70
成像干涉光谱仪信噪比分析公式……71
各种噪声估计方法的对比分析……71
土壤调整植被指数的计算公式……71
总光合作用率估计模型……71
土壤水分-反射系数……72
宽波段和高光谱植被指数……72
NO_2 含量的太阳光谱遥测模型……72

第三章 遥感信息处理与分析……73
冠层受到的净辐射计算公式……73
作物绿度的计算模型……73
二维遥感数据的判别分析模型……73
农作物判别的曲线模型……73
地面温度的计算公式……73
陆地卫星影像数字处理的环境背景效果增强模型……73
单位面积土壤辐射功率 W 模型……74
基于遥感数据的地上生物量估计模型……74
流域径流遥感估算模型……74
气温和日照区划方法……74
NOAA-CCT 草场产草量分析公式……75
L-波段土壤发射率与土壤水分含量的关系模型……75
SIR-A 图像的灰度值与土壤复介电常数的关系模型……75
绿色因子的计算模型……76
两场降雨范围模式之间吻合度的交叉相关模型……76
冠层反射系数 CR 计算模型……76
大沙漠中植被的季节及年季变化的关系模型……76
森林生物量和体积的机载激光雷达数据估计模型……76
微波极化差指数与归一化差植被指数的相关灵敏度模型……76
森林生态的数字地形模型……77
目标函数模型……77
马尔可夫平稳随机域模型……77
雪线高度模型……77
遥感图像自动识别与分类模型……78
纹理模型和纹理识别模型……78
森林蓄积量的估测模型……78
利用 TM 资料对湖泊和滩地调查的理论模型……78
定义相似程度的计算模型……79
两维接边选择方法和彩色图像的镶嵌模型……79
松树林冠层的短时热响应的测量模型……79
地形对遥感数据影响的评估模型……79
标准概率松弛方法的性能分析模型……80
遥感信息与地理数据复合的数学模型……80
冬小麦遥感估产模型……80
植被信息恢复模型……81
计算冬小麦种植面积的两种方法……81
植被指数的大气及视角校正模型……81
基于最大似然分类法的面积估计改进模型……81
24 小时蒸散量的计算模型……81
小麦的谱响应及其与农业变量的关系模型……82
农田表面能量平衡的分析模型……82
FCM 分类方法……82
波浪波长和方向提取的图像纹理分析模型……82
利用 Landsat TM 图像及地面收集数据对农作物面积进行估计的两种方法……83
几何-光学冠层模型……83

地质统计学方法 ……84
KAPPA 统计模型……84
端元比例方法 ……84
季节性积雪估算公式 ……84
水库蓄水量模型 ……84
卫星遥感水下地形地貌的模糊判别模型……84
土壤水分的遥感监测模型……85
农田全日蒸散总量的遥感瞬时估算模型……85
TM 图像信息特征提取方法……85
植被冠层 PAR 吸收率和归一化植被指数的 SAIL 模型……86
不完全冠层表面温度的物理模型……86
利用误差矩阵改进的最大似然分类方法……87
AVHRR 的分离窗方法……87
地表温度的 SWT 算法……87
均匀区域上植被覆盖的叶面积指数……87
辐射率 R 模型……88
用气象卫星资料监测积雪的计算方法……88
悬浮泥沙遥感定量的统一模式……88
航片抽样精度的估算——抽样误差 E 模型……88
K-T 变换公式与森林蓄积量估算模型……88
遥感积雪识别中的分级模糊聚类算法……89
(X, Y, Z)颜色系统与(R, G, B)颜色系统的转换模型……89
SCS 模型的改进……89
土壤侵蚀定量模型……89
叶绿素含量及 Tahoe 湖深度的估计模型……89
红外遥感油气资源勘探的技术方法……90
叶面积指数与 CASI 数据的相关关系……90
土壤背景二轴纠正的植被指数 T_{WVI} 模型……90
航空遥感测量海面油膜厚度的基本公式……90
油气勘查模型……91
水稻减产量 P 模型……91
大面积小麦遥感估产模型……91
田块尺度的蒸散(ET)估计模型……91
冠层后向散射的 Water-cloud 模型……91
多源遥感数据分类精度的评估模型……92
I_{ndv} 时间变化图的半经验公式……92
蒸发率的遥测模型……92
Kriging 插值模型……92
蒸发系数与植被指数间关系的模拟模型……92
小麦地土壤及作物参数的估计模型……93
植被冠层中双向间隙函数及其测定测量模型……93
分维值 D 模型……93
距平植被指数模型……93
提高土地覆盖精度的相关模型……94
亮度值转换模型……94
绝对湿度模型……94
热惯量及热扩散率模型……94
覆盖度损耗模型……94
观测和分析反演方程……95
SAVR 法分维估计与方向分维纹理度量模型……95
薄云覆盖下水体的气象卫星识别模型……95
水稻遥感动力估产模拟的建模方法……95
线性 2^m 叉数的自然数编码及其收敛性分析……96
TM 影像配准及其作物估产方法的精度检验模型……96
陆地表面状态参数估计的遥感算法……96
利用微波亮度温度估计近地面空气温度的经验模型……96
生物物理参数的反演算法……96
尘土反射率、面积百分比及负荷之间的关系模型……97
计算日土壤水分蒸发蒸腾损失总量的积分值法……97
fBm 纹理分析模型……97
渍害遥感的理论识别模型……97
纹理测度模型……98
烃类微渗漏信息计算机提取的 OIF 指数……98
微观像纹理与宏观像纹理提取方法……98
植被指数模型……98
纹理特征测量及迭代四叉树分割模型……98
树冠叶面积体密度 $L(x,y,z)$模型……98
纹理监测函数器及其多尺度分析模型……98
微波信号传输的雷达方程……99
几种主要消除斑点噪声滤波处理算法的数学模型……99
空间域滤波模型……100
太阳直射光谱遥感大气柱水汽总量模型……100
TM 图像数字镶嵌的坐标变换及其精度模型……100
普朗克方程——光谱辐射强度……100
遥感影像纹理分类模式……100
基于 FPAR 的简化生长模型……101
叶、土壤反射模型……101
雪灾判别模型……101
生物变量的高光谱估计模型……101
卫星遥感估测土壤水分的相关模型……101
双层热平衡模型……102
灰度变化的平流方程……102
TIMS 图像的定标处理与温度图像的生成模型……102
Kappa 系数……102
图像分割中随机噪声的影响分析模型……102
样条二进小波的影像多尺度边缘检测模型……102
SSM/I 数据的信息获取数学模型……103
土壤后向散射模型……103
气候胁迫与草地 NDVI 时间积分关系的分析模型……103
高光谱数据的导数分析模型……103
从 AVHRR 短波波段估计 BRDF 的数学模型……104
岩石的热模型……104

农田 T_B 及其指数的辐射传输模拟模型……105
海洋水色遥感信息特征量的分析模型……105
BRDF 模型……105
多源遥感影像融合的相关模型……106
匹配滤波结合 Chirp Scaling 算法……106
IHS 变换复合方法及其像质评价标准……107
简化的 IEM 模型……108
Lee 的滤波算法模型……108
大气水汽和气溶胶对获取地表温度影响的计算模型……108
土壤水分含量的遥感估测模型……108
木本和草本植被覆盖度估算模型……109
第二代一般全球生产力效率模型(GLO-PEM2)……109
地表粗糙度影响的消除模型……109
稀疏植被的 NDVI-T_s 关系及蒸腾率的估算模型……110
较大像元的 I_{la} 的计算模型……110
大气吸收的校正模型……111
散射模型……111
快速近似主成分分析算法……111
信号的多尺度分析算法模型……112
散射系数 σ^0模型……112
海水反射率 $R(\lambda)$模型……112
干涉雷达复图像配准方法分析模型……112
激光测距点分析与阴影分析模型……112
城乡断面上城市土地利用信息提取模型……113
相近指数……113
景观的异质性分析方法……113
土壤线的数学表达式……113
调制传递函数 $T(L)$模型……114
估计非均匀冠层植被参数的混合模型……114
基于分数布朗几何的粗糙表面模型……114
FLIM 模型及其修正……114
气溶胶模型……115
土地覆盖类型面积大小的预测模型……116
BRDF 校正模型……116
土地覆盖分类的机器学习算法的多种判据……116
植被水分含量的计算模型……117
基于生理视觉的静态边界模型……117
水稻微波后向散射模型……117
多源信息融合分析的证据推理模型……117
海水微波测厚理论模型……118
混合像元组分温度的多角度遥感数据反演模型……118
贡献率……118
多角度 POLDER 数据互易原理的验证模型……118
高分辨率遥感影像的几何纠正模型……119
极化数据的目标分解模型……119
雪面反照率的反演模型……119
图像 DN 值与反射率关系模型……120
SAR 影像滤波模型……120
TM 对 NOAA 面积校正模型……120
蒙特卡罗模拟原理与方法……120
海冰密集度计算模型……120
多光谱数据压缩系统基本方法……121
大气影响校正模型……121
冠层反射的简化模型……121
定量统计分析模型……121
Kappa 系数模型……122
人工神经网络遥感影像分类模型……122
构造遥感数据向量的角度关系模型……122
区域构造变形场及应力场定量分析模型……122
绿量的遥感测算模式……122
遥感信息模型……122
多光谱图像无损压缩变换……123
斜率法……123
纹理特征统计量模型……123
系统误差与随机误差的分析处理模型……123
作物冠层的能量平衡方程……124
全极化散射的 Mueller 矩阵解……124
数字正射影像的关键镶嵌技术……124
小波多分辨率分析方法……124
分类 K-L 变换……125
影像压缩理论模型……125
误差模型……125
区域的线性蒸发散模型……125
USLE 模型中植被覆盖因子的定量估算……126
电波在地下介质中二维传播方程……126
变化向量的变化强度模型……127
Radon 变换模型……127
几何纠正的数学模型及其线性化……127
像元地面反射率的反演模型……127
基于曲线论的变化探测模型……127

第四章 地图……129
横轴墨卡托投影和高斯-克吕格投影公式……129
等面积纬度和等量纬度与地理纬度的关系式……129
简单几何形体的高程面积曲线……129
坐标变换的基本方法……129
统计数据分析和分级方法(t 检验)……130
专题制图系统中面状符号、符号位置及独立符号子程序……130
叶片的水分指数(L_{WCI})计算模型……131
图像变换局部增强法公式……131
森林潜热通量密度的遥感作图方法……131
区域变量理论……131

消除经纬仪高度对遮蔽角影响的计算方法……132
地表能量平衡成分图制作的相关模型……132
遮蔽区域内任意点的遮蔽角和方位角的计算公式……132
多焦点投影公式……133
纠正的基本原理……133
两种自然现象之间的重合度计算公式……133
半变图的计算公式……133
空间实验室测量相机像片的几何特性及其精度分析模型……133
加密点预期精度估算公式……134
图像处理的样条函数……134
地理背景底图制作及等值线图绘制的相关模型……134
基于冠层反射模型的森林植被图制作……134
图形梯尺公式……135
图斑取舍方法……135
利用SIR-C/X-SAR图像描述北部森林的碳特性……135
制图准确度评估模型……135
雷达图像大范围校正模型……136
地理信息系统可视化专题制图要素分级方法……136
粗略分辨率和精细分辨率数据的组合使用……137
评价植被生态利用分类图的定量模糊方法……137
分类器及其组合模型……137
利用相关松弛法寻找GOP……137
稳态迁移因子模型……138
大气校正的时间内插模型……138

第五章　地理信息系统……139
山地地形参数计算模式……139
多边形面积模型……139
因子属性的敏感性分析公式……139
地形描绘的数学方法……139
国土地形成像过程的数学模拟与几何失真恢复模型……139
MLREIS 土地资源评价模型……140
生产潜力模型……140
卫星遥感数据景的地理坐标工程计算公式……141
GIS 支持下坡面太阳辐射的计算公式……141
定级信息系统的空间分析模型……141
VI 与其他环境参数的关系模型……142
GIS 支持下森林火场蔓延的空间模拟模型……142
分形内插与DELAUNAY三角网结合的可视化数据模型……142
空间数据的三角形四叉树结构……142
格点破度变化率……143
草地雪灾监测分析公式……143
山洪灾情评估模型……143
农田损失的GIS评价公式……144
空间分解模型……144
森林生态系统中氮矿化量的地域性估测模型……144
LISEM 子模型……145
基于地理信息系统的数字环境模型……146
海洋初级生产力遥感与GIS评估模型……146
土地资源生态环境背景与利用程度关系的分析公式……146
土壤侵蚀量的估算……147
拓扑一致性模型……147
三维立方体体元双线形插值公式……148
频率计算公式……148
地形纠正的数字高程模型……148
粮食生产潜力计算过程……148
地貌特征参数的选择与计算……149
洪水灾害风险评估的指标模型……149
贝叶斯统计推理定理及模型……149
GIS 中缓和曲线的不确定性模型……149
土地资源综合潜力评价模型……150
水库实际库容及水域面积计算公式……150
土地利用分类及变化转移矩阵……150
地貌分形形态模拟的实现……150
扩展强度指数……150
流域相对不易产流度计算公式……150
地理曲线的定位误差模型……151
辽河三角洲湿地净化的空间模型……151
三维显示的基本原理……152
基于GIS与空间统计分析的可持续发展评价模型……152
土壤流失预测模型……152

第六章　其他综合模型……154
树冠中的光线衰减模型……154
取样程序……154
植被冠层模型……154
资源评价模型……155
数学模型灵敏度……155
雷达后向散射系数与土壤水分关系模型……155
冬小麦产量县区域尺度的估计模型……155
产量与胁迫程度-天数的统计关系模型……155
Suits 模型……155
估计农作物面积的混合模型……156
植被覆盖土壤的雷达后向散射系数计算公式……156
树高计算公式……156
有限大小农田分类的大气影响纠正模型……157
热惯量计算对环境因子变化的敏感性模型……157
太阳能分布的非线性回归模式……157
Suits 微分方程与层散射矩阵……158
玉米和大豆生长阶段的估计模型……158
二次样条函数模型……158

宏观地理系统引水模型……158
数学模型的建立及亚热带北界的确定……159
费用、效益分析计算公式……159
温度胁迫指数……159
能量平衡法分析模型……159
田块尺度农作物分布选择模型……160
优化土地管理的目标函数……160
微波数据解译影响校正模型……160
辐射传输与冠层净光合作用率的评估模型……161
反射辐射通量密度的理论计算模式……161
半球面的 exitance 实际值(*M*)与底点辐射(*N*)的线性回归模型……161
Krige 系统方程组……162
地表土壤水分的植被指数估计模型……162
实际冠层反射系数……162
土壤浅表水分的微波测量估计模型……162
机载伽马射线雪测量数学模型……162
基于陆地卫星图像的洪水随机模型……163
TERSAIL 数值模型……164
Zipf 定则及其广延出的自然资源数量模型……164
植物与大气间的湍流交换模式……165
产量与辐射截获量关系模型……166
NOAA/AVHRR 资料的订正模型……166
叶片指向和叶片反射的镜向成分对冠层双向反射的影响模型……166
雪水等价值受森林生物量影响的估计模型……167
基于知识库系统方法的流域酸化模型……167
水稻产量遥感资料估算模型……167
水资源的均衡状态与决策模型……168
从定性向定量转化的判别决策函数模型……168
蓄积损失估测模型……168
水质变化趋势及其成因分析公式……168
水文时间序列不均匀系数的分析与计算模型……169
环境对区域丰度的影响模型……169
燕麦地微波辐射的季节性演化模型……169
土壤有机物成分对土壤微波发射影响的观测模型……169
净辐射和土壤热通量的谱估计模型……169
显热通量密度的涡度相关法测量与空气动力学粗糙度参数估计模型……170
绝对水分浓度的计算公式……171
农业气象模型……171
针叶林冠层间隙概率的辐射测量模型……171
环境因子的多元回归分析模型……171
遥感图像因子分析的理论模型及算法……172
功率谱分析中几个重要公式……172
测定农田蒸发的计算方法……172
区域玉米水分状况估计模型……173
冠层透射率与叶面积指数转换关系公式……173
森林冠层反射模型……174
物理"云"方程……174
从光学测量值确定植被冠层参数的目标函数……174
有限叶片聚集体中光子相互作用横截面的计算公式……175
沙漠化系统动态仿真模型……175
资源最优空间配置的系统经济数学模型……175
森林资源动态计算公式……177
效益计算的基本公式……177
人口、资源、环境协调发展的系统动力学模型……177
冠层荧光模型……177
光合作用有效辐射的遥感模型……177
支持森林监测的一个新的森林-光相互作用模型……178
冬小麦旱情遥感监测模型……178
变权模型……178
资源配置的灰色动态模型……178
地质勘查中的数字图像处理技术及矿产预测模型……178
冠层反射率的二阶导数……179
生物量产出模型……179
MSWRSIS 系统的评价指数……179
居民生活条件的综合评价指标……179
地下水资源系统多目标管理模型及模糊带权方法……179
融雪期雪面的能量平衡方程……182
灌溉水库优化调度的 AD 模型……182
阶乘模型的基本方程……184
自然资源综合优势度……184
水资源承载能力综合评价模型……184
基于反射率的农作物效率计算公式……185
森林反射率随年龄变化轨迹的非线性回归曲线……185
利用卫星遥感在空间维和时间维上的外推模型……185
叶冠的热点效应的模型……186
蓄积量的计算机模拟……186
中国自然致灾因子特征值……187
旋钮构造的数学模型……187
水资源价值耦合模型……187
AVHRR 分割窗口温度差与大气在陆地表面可降水量关系的模拟模型……187
土壤水分的遥感微波测量模型……188
气孔生理学模型……188
NPP 的 CASA 模型……188
耦合多谱段卫星数据的 Sahelian 草原区域性模型 I……188
耦合多谱段卫星数据的 Sahelian 草原区域性模型 II……189
土地覆盖类型辨识模型……189
地震灾害分析模型……190
三"S"一体化技术的系统模型……190
自然灾害程度的指标体系及灾情变率计算公式……190

流域干燥指标及人类活动影响径流的强度指标…… 190
资源利用者对资源的利用关系、共存系统模型…… 190
CLAIR 模型与 Cloud 模型…… 191
生态变化遥感监测评价模型…… 191
土壤-植被-大气连续体中蒸散过程的数值模式…… 191
自转地球上板块的运动态势…… 192
库区劳动力资源预测的基本模型…… 192
山地、湖泊的三维大气-斜压水动力学耦合模式…… 192
温氏法回归方程…… 193
地理系统中的非均质空间随机扩散方程…… 194
农田水分动态模型…… 195
光线衰减系数对于叶面积指数的优化调节模型…… 195
沙漠化灾害危险度综合评价模型…… 195
森林生物量计算公式…… 196
潜在蒸发量的全球模式…… 196
北部生态系统生产力模拟模型…… 196
淤地坝系规划设计的计算模型…… 197
区域水资源供、需协调系数的计算…… 197
现代荒漠化过程的演化模型…… 197
经济基础研究方法…… 198
空气污染模型…… 198
城市环境变化探测的 4 种算法…… 198
能量通量模型…… 199
绿色植被指数…… 199
过火面积的组合判别模型…… 200
半变量定义模型…… 200
自组织神经网络模型…… 200
辐射模型…… 200
作物生理模型…… 200
三维定位模型…… 201
法锥面方程…… 201
流域水文对全球气候变化的响应模型…… 201
相位解缠——泊松方程…… 202
水稻作物气候产量预报模型…… 202
人工神经网络(ANN)模型…… 202
NOAA/AVHRR 数据的旱情监测模型…… 202
土地覆被变化的统计模型…… 203
土壤限制蒸发信号的探测模型…… 203
模糊 ARTMAP 模型…… 204
反演模型的目标函数…… 204
模糊似然度计算模型…… 204
数字环境模型…… 204
自组织网络结构模型…… 205
黄淮海地区冬小麦光温生产潜力模型…… 205
遥感图像分类模型…… 206
大气微量成分总含量反演模型…… 207
平均回波能量模型…… 207
环境质量评价模型…… 207
车辆导航与监控中 GPS/GIS 实时定位配准误差分析模型…… 208
H 总光合作用量模型…… 208
浅草生态系统中辐射利用效率的时间过程模型…… 208
经验性土壤水分估计模型…… 209
探测森林雨水存储的数学模型…… 209
流域土壤水分指数…… 209
叶面积指数的经验估计公式…… 209
玉米叶片中叶绿素浓度的估计模型…… 210
土壤物理特性的遥感和人工神经网络估计模型…… 210
维纳和申农对"信息系统"的数学描述…… 210
目标物与环境的表观温度模型…… 210
机载三维遥感的动态 GPS 数据处理模型…… 210
星载散射计反演海面风场的场方式反演算法…… 211
二氧化碳倍增条件下的遥感-光合作物产量响应模型…… 211
数学形态学的基本运算…… 212
多维参数同时反演的遗传算法…… 212
基于遗传算法与人工神经网络的玉米估产评价函数…… 212
控制面积及图斑实际面积的计算模型…… 212
载波相位相对定轨及模糊度解算模型…… 213
沉积物采样与粒度分析模型…… 213
土壤水分的实际变异函数…… 213
流域物质与水系及产沙间非线性关系模型…… 213
利用 SIR-C 数据的土壤水分估计模型…… 214
离散傅氏变换…… 214
后向散射模型参数化的半经验模型…… 215
环境无害化技术评价模型…… 215
图形重建算法…… 215
牧草产量气象预报模式…… 216
连续植被组分温度的遗传算法反演模型…… 216
合成孔径雷达图像的近岸海面风场反演模型…… 216
碳库估算模型…… 217
遥感技术监测船舶航速的相关模型…… 217
组合 GPS/GLONASS 观测值随机模型…… 217
城市热力空间分析模型…… 218
水环境保护与经济发展决策模型…… 218
模糊聚类神经网络基本原理…… 219
雪深反演模型…… 220
陆面温度反演模型…… 220
基于粗糙海面高度频谱函数的雷达后向散射系数计算模型…… 220
定位原理与定位方程…… 220
森林蓄积 LS 估计自变量选择模型…… 220

第二篇 自然地理学

第七章 气候……223

海拔高度与气压测算公式……223
大气中水分物质循环计算公式……223
起砂风速和砂丘移动速度公式……223
大气水分循环分析公式……223
华南冬季温度变化起伏程度计算公式……223
热量平衡计算公式……224
划分气候地带的主要指标……224
降温强度……224
斜坡上的降水强度公式……224
热量平衡公式……224
海洋和大气的能量交换分析公式……224
湿润系数和蒸发度的计算模型……225
干湿频率的计算模型……225
太阳辐射和日照时数的经验关系模型……225
地气系统辐射平衡和大气辐射平衡的计算公式……225
净辐射模型及其计算公式……225
空气动力学方法评估模型……226
开垦地的热量平衡特征模型……226
水热平衡联系方程……226
西藏高原1～12月平均温度的估算公式……226
旱涝指标公式……227
蒸发力计算公式……227
最大晴天总辐射的多元回归方程……227
非水平面上实际日射强度和日射日总量的计算公式……227
地极移动对气压场和大气活动中心可能影响的分析公式……228
月总辐射模型……228
平均水汽含量的计算公式……228
计算大气影响的表达式……228
北半球自然地带性数学模式……228
风雪流的起动与运行分析公式……228
山地气象要素垂直分布规律的数学模型……229
大气污染程度计算……229
气候生产潜力的阶乘型数学模型……229
球坐标连续方程……230
蒸发力的计算公式……230
水汽输送分析公式……230
坡面天文辐射总量模型……230
黄土高原的暴雨特性分析公式……231
晴天太阳总辐射分布特征分析方法……231
蒸发力计算公式(彭曼公式)……232
风能模型……232
多年冻土地带性分析公式……232
高原贴地层 R_i 数……232
光合生产潜力模型……232
太阳总辐射模型……233
气候学中的反射率公式……233
理想气体状态方程……233
山地降水量分析公式……233
有效辐射公式……233
能量密度计算公式……233
生长的ARMA模型……233
压高公式……233
中国地区太阳紫外辐射分析公式……233
泥炭形成的水热临界指标……234
大气水汽输送分析公式……234
滇池温效的计算方法……234
游程转折时间与周期的平均数与方差……234
墙面太阳辐照的理论计算公式……235
康拉德公式……235
有关辐射的计算公式……236
太阳直接辐射光量子通量的气候学计算公式……236
热岛强度及其气候要素的计算公式……236
历史气候信息处理公式……237
黄土丘陵沟壑区小流域土壤流失量预报方程……237
气候要素场的主成分分析……237
黄土高原蒸发力的计算模型……238
山区年、月平均温度推算公式……238
山区任意地点、任意时段温(湿)度场表达公式……238
相似条件和模型雪……238
地表蒸发过程分析公式……239
复杂地形下非各向同性散射辐射模式……239
沃尔什函数……239
坡面辐射平衡方程及其各分量的气候计算方法……239
历史气候信息评价模型……240
小流域太阳能模型……240
旱涝指数公式……240
检验样本是否突变的方法……240
梯度扩散理论及 Eulerian 长度尺度模型……241
气候特点分析公式……241
山区毛竹气候生产力估算模式……241
风能资源评价模型……241
风速模型……242
林带对空气的湍流交换系数影响的分析模式……242
亚热带北界线热量综合指数计算公式……243
蒸发的抗阻模型及气孔阻抗计算公式……243
扬沙能力的计算公式……243
准两周振荡物频带滤波公式……243
低空污染气象条件分布计算公式……244

地理要素对温度分布影响的数量评价模型……244
降雨雨滴分布模型……244
月平均气温计算公式……244
拉萨近地层风廓线模拟模型……244
风资源的估算公式……244
坡风热力不稳定临界瑞利数计算公式……245
气候灾害度计算公式……245
焚风模式……245
非静力近似小尺度数值模式……246
修正的彭曼方程……246
样条函数插值法……247
水汽含量模型……247
黄河流域旱涝年夏季蒸发的计算公式……247
火山喷发对辐射传输影响的数学模型……247
大气浑浊度系数计算公式……248
互补相关蒸散发理论的计算公式……248
焚风气候数值模拟……249
蒸散量计算公式……249
下垫面变化的气候效应公式……249
活动积温及其持续日数变化公式……250
MT-CLIM 模型……250
城市边界层热岛的数值模拟方程……250
湍流无因次标准差……251
太阳辐射资源时空变化规律模型……251
纬向平均气候模式……252
风应力的整体空气动力计算公式……252
感热、潜热通量的时空特征计算公式……252
气象因子的统计模型……252
北半球最热坡度的解析模式……252
W-T 模式……253
冷、暖期温度的纬向谐波特征公式……253
EBM/BD 模式……253
划分气候类型的指标……254
交界带平均气温推算公式……254
洪涝指标计算及分形结构的定义公式……254
整体空气动力公式……254
极涡面积指数和极涡强度指数……254
宏观地面气温场气候学方程……254
太阳辐射量变化规律模型与趋势的计算公式……255
干旱指数计算公式……255
青藏高原积雪变化趋势检验的统计模式……255
山地降水垂直分布三参数高斯模式……255
气候边际效应计算公式……255
风生流三维数值模拟……255
坡面天文辐射总量的椭圆积分模式……256
山地背风涡旋的数值模式……256
气候变化对日极值气温及日雨量影响的分析公式……256
逐日平均气温线性模型……257
青藏高原光合有效辐射的气候学计算模式……257
光合生产潜力模型……257
青藏高原积雪变化的趋势分析模型……257
大洋暖池重心计算模型……257
沉积环境分析的转换函数……257
海域年海表温度值与年热带气旋频数的统计关系……258
对等辐照方位与建筑朝向的选择模型……258
西伯利亚高压强度指数的计算模型……258
光能利用率模型……258
泥炭形成的界限气候指标……258
月平均地表反照率……259
大地/大气界面传输的 GSVAT 模型……259
SST 温度计模型……259
未来气候变化对中国东北地区水热条件影响的数值模拟模型……259
采暖耗能公式……260
气候异常对策集成评价模型……260
气候异常直接经济损失预测模型……261
热带气旋灾情的隶属函数模型……262
气候突变的 Yamamoto 法和 Mann-Kendall 法……262
荒漠化地区降水年际变化的归一化反常指数……263
陆地碳循环平衡模型……263
污染物的环境容量模型……264

第八章 地貌……265
地球形状数学表达公式……265
自由河曲形成与演变公式……265
Л. A. 瓦尔达尼扬茨公式……266
有关沙丘移动的线性回归方程式……266
河口沙坎形成条件分析公式……266
黄河下游的冲淤规律分析公式……266
作用于单颗沙粒的几个主要力的估算公式……266
泥石流基本特征值的计算模型……267
地貌相关分析公式……267
地貌形态基本类型数量指标……268
卵石推移质汇入百分数计算的模式……269
突变模型的数学表达……269
河床地貌演变研究的计算方法……269
长江三峡黄陵背斜区产沙模数……270
地形计算公式……270
地貌气候单位线模型及流路概率计算公式……271
小流域侵蚀地貌形态模型……271
理想流域河谷纵剖面抛物线方程……271
中国地貌基本类型分类指标系统……271
河型影响因素的判别模型……272
几何体侵蚀体(负值)与堆积体(正值)的泥沙重量

计算公式……272
沙波推移率公式……272
侵蚀流域系统的信息熵模型……272
地貌发育阶段的定量分析公式……272
河口分汊的定量表达……273
黄淮海平原河流的纵剖面凹度特征分析公式……273
水库下游再造床过程的相关数学表达公式……273
Γ 型地貌瞬时单位线计算公式……273
Leendertse 地转非线性二维流场数值模型……274
水流总能耗率(自河源至河口)……274
曲流河型河床可动性表达式……274
划分分汊河道的结构类型的综合指标……275
河流处于相对稳定时的数学表示式……275
干旱和风沙活动的预测……275
河流运动方向模型……275
现代三角洲岸线变化的预测……275
海岸线轮廓演化的解析模型……276
构造运动影响河流纵剖面及河道冲淤的数学模型……276
喀斯特洼地的分形维及其洼地周长与面积计算公式……277
南极洲纳尔逊冰帽动力学特性的计算公式……277
海滨线的后退速率公式……277
Newman 公式……277
砾石风化圈厚度的估算模型……277
黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型……278
递加侵蚀规律模型……278
风沙二相流运动分析模型……278
斯特拉勒数学模型……279
扩散模拟型流域地貌汇流模型……279
河流形态的分维计算……280
河口自动调整及地貌解释……280
泥石流的结构两相流模型的理论表达……281
泥石流的结构两相流模型……281
采煤塌陷地动态演变规律分析模型……281
分形布朗地貌演化方程……282
沟壑密度计算公式……282
崇明岛发育长度的理论公式……282
Bruun 模式……282
风蚀流失量模型……283
蚀退模式和演变趋势分析……283
自然地理界线划分的可拓工程方法计算公式……283
区域风沙蚀积量和蚀积强度分析模型……284
流域沟壑密度理论极值数学模式……284
河谷地貌特征指标……284
珠江三角洲海平面上升对堤围影响的分析公式……284
危险度分区界线值计算……284
地震应急需求的概念模型……285
水流最小消耗能原理……285

第九章 土壤……286
侵蚀模数等值线校核计算公式……286
土壤热量交换强度计算公式……286
土壤水分平衡公式……286
土壤湿度及其他环境因子的估算模型……286
潜在的土壤水分蒸发蒸腾损失总量计算公式……287
土壤覆盖热效应分析公式……287
土壤热交换量计算公式……287
黄土地区茆坡的坡地特征与土壤侵蚀计算模型……288
成土过程的湿润效应 M 模型……288
土壤基底物质衰减模型……288
物质微粒移动时间的分布函数……288
土壤元素背景值的表达模型……288
相容度模型……289
评价土壤侵蚀与土壤生产力关系的模式分量模型……289
土壤侵蚀、运移和沉积的模拟……291
以能量平衡为基础的干旱指数……291
土壤汞环境容量模型(重金属物质平衡模型)……292
蒸发量与土壤湿度和地下通量关系分析公式……292
确定林地枯落物最佳蓄积量的数学模型……292
土壤侵蚀量的推算模型……292
土壤的磷吸附率及其连续变化的计算公式……293
变动河床数学模型……293
铬在土壤中的平衡与累积预测公式……293
水库滑坡的稳定系数……293
土壤热惯量模式……293
土壤水分运动及土壤水通量的计算公式……294
二维土壤蒸发过程的数值分析模型……294
土壤侵蚀量计算模型……295
土壤侵蚀的基本规律模型……295
通用土壤流失方程……295
崩塌(滑塌)和滑坡模型……295
固定过滤反应中土壤放射性核物质迁移模型……296
土壤孔隙度模型……296
SOINFIL 模型……296
土壤流失量模型……296
土壤环境容量模型……296
水稻土肥力限制下的生产潜力模型……296
土壤一维垂直连续入渗模型……297
悬移质含沙量垂线分布公式……297
侵蚀强度计算公式……297
农耕地土壤侵蚀量模型……297
草地土壤水盐运动规律模型……297
土壤修正系数公式……298
土壤质量的综合指数 N 模型……298

抗剪强度模型……298
隔坡沟状梯田土壤水分变化规律模型……298
土壤截留及其适宜度统计模型……298
土壤水和土壤水分蒸发蒸腾损失总量的BOWET模型……299
土壤崩解速率及其与土壤抗冲性的关系模型……299
土壤水分的光学测量模型……299
土壤中农用化合物随地表径流迁移的计算模型……300
临界坡度的能量公式……300
含水量与基质吸力的关系模型……300
土地退化程度指数……300
土壤侵蚀模数……300
风蚀率 E 与土壤含水率 M 的关系模型……301
气体排放量计算方法……301
土壤侵蚀因子定量评价模型……301
土壤侵蚀模型……301
耕作的数值模型……301
风蚀物随高度的分布模型……302
土壤表面蒸发阻力模型……302
土壤侵蚀的核示踪技术……302
土壤-植物-大气系统的综合计算与模拟……303
根系层土壤水分动态变化模型……303
三种土壤铅和镉的质量的分析系数及金属含量计算公式……303
单位土层根系吸水效率……303
淤地坝减洪减沙效益计算模型……304
土壤侵蚀量的计算模型……304
滑坡活动的活跃性模型……304
农田土壤水分模型……304
土壤中溶质运移模拟……304
土壤碳的动力过程……305
土壤 CO_2 排放模型……305
土壤水分状况估算的彭曼公式……306
侵蚀模型……306
土壤水分及土壤-大气界面对麦田水热传输的计算公式……306
土壤侵蚀发展动态SD模型……306
土壤碎屑过程控制 ^{15}N 示踪物向森林植被移动的估算公式……307
土壤肥力综合指标 I_{FI} 模型……307
土壤有效磷模型……308
土壤水分蒸发蒸腾损失总量(ET)估算模型……308
面蚀临界坡度的理论分析模型……308
土壤可蚀性计算公式……308
非饱和土壤物理特性数据的数理基础分析模型……309
吸附等温方程……309
土壤侵蚀过程的相关模型……309
土壤盐渍化与地下水动态特征关系模型……310
沉排宽度模型……310
半干旱地貌的植被-土壤耦合双向反射模型……310
土壤容许流失速率……310
半干旱地区土壤盐碱化预报模型……310
残存森林的碳(CC_3)和来源于 C_4 植被中的碳(CC_4)的计算……311
地下碳循环过程中的碳同位素的比率……311
土壤有机物的年龄与土壤呼吸的估算模型……311
土壤侵蚀方程与降雨指标模型……311
元素在不同尺度的相关特征模型……312
土壤有机质与土壤养分平衡分析模型……312
概率生成函数……312
土壤侵蚀综合指数……312
沟谷侵蚀—堆积模式……312
泥石流的流速方程……313
以 ^{210}Pb 核心为基础的一个经验模型……313
黄土滑坡群的系统分析模型……314
Kriging 和 Cokriging 估值模型……314
滑坡高速滑动过程中滑动面温度 θ 的变化规律模型……314
土壤退化指数……314
风化强度计算公式……315
旋转主成分分析……315
土壤微生物生物量磷的测定模型……315
植被覆盖率与风蚀输沙率定量关系模型……315

第十章　水文……317

海水运动实验公式……317
海水运行公式……317
潮力公式……317
海流分析公式……317
河流稳定性指标(表1)……318
草原和森林草原区域河流径流状况分析公式……318
内陆河流水文特性分析公式……319
游荡指标……319
土壤-植物-大气层系统中水分的传输模型……319
水量的供需平衡方程……320
黄土高原森林对年径流影响分析公式……320
整个冰川的物质平衡方程……320
河系结构分析公式……320
黄河下游挟沙能力自动调整机制分析公式……320
小流域汇流非线性模式……320
降雨径流模拟模型……321
流域汇流的非线性关系及其处理模型……321
不均匀系数的计算模型……322
地表径流量估算……322

降雨入渗补给地下水计算公式……323
群分析的相似性统计量……323
盐水入侵长度变化模型……323
不均匀系数……324
边界条件对水库下游河床演变的影响模型……324
喀斯特地区河流水文分析公式……325
泥石流运动机制分析公式……325
河川径流年内分配计算公式……325
河相关系模型……326
降水量 P 模型……326
地下水补给量模型……326
地下水流模型……327
南水北调东线水质污染和湖泊水生经济的系统分析模型……327
年陆地蒸发量计算公式……327
河网密度与流域形态的经验关系式……328
地下水资源的计算公式……328
水位涨落率模型……328
某点的电阻率与该处的水分含量的关系模型……328
泥石流沟综合评判的数学基础……328
水文频率曲线的线型模型……329
鱼鳞坑的水力性质及设计指标的计算模型……329
河流水质分析公式……329
二阶有序法的建立……330
地下含水层动态模型……330
喀斯特地貌演化与喀斯特含水层特性相关模型……330
历年的历史旱涝等级计算……331
冰川水资源的估算模型……331
山地最大降水高度数学模型……331
水面蒸发估算模式……331
Minkowski 距离模型……332
暴雨标准确定模型……332
暴雨区划方法及模型……332
降水量 R 计算公式……332
河水的化学稳定性指数和侵蚀系数……332
协调分析的通用数学模型……332
关联度模型……332
模式计算公式……333
圣维南方程组……333
多年平均陆面蒸发量计算公式……333
综合灌溉定额计算公式……333
山地降水垂直分布模式……333
泥石流转化的条件……333
汾河水库泥沙淤积灰色模型……334
水平衡方程……334
估算古水文要素的模型……334
卤水蒸发模式……334
黄土地区修建淤地坝的洪水标准设计模型……335
因子量化的基本方法……335
长江口泥沙来源分析与数量计算模式……335
离散线性水文系统模型及其参数估算……335
黄土高原小流域特性指标与产沙统计模式……336
水网系列水质模型……336
尖点型突变模型……337
水石流平均速度……337
流域侵蚀产沙和物质转移数学模型……337
水量调控指标……338
水资源量及其分布规律模型……338
水流冲刷沉积物生成泥石流的条件及运动规律分析公式……338
自动径流泥沙测站的设计模型……339
山区小流域洪水过程中泥沙搬运方式分析公式……339
浅层地下水的天然资源及开采资源的评价模型……339
泥石流阻力分析模型……339
泥石流冲击力指标……340
泥石流流量指标……340
简化的积雪场硫酸盐模型……340
经验特征函数法……340
冲积平原盐碱低洼地治理模式……340
流体力学方程组……340
小流域水土流失量模型……341
GM(1,1)模型……341
天山中段及祁连山东段河流的径流量模型……341
降雨量与降雨强度测定模型……341
水体对湍流交换系数影响的计算公式……342
溅蚀总量的预报方程……342
水量平衡模型……342
GM(1,1)模型的时间函数……343
西北内陆平原水资源分析模型……343
小流域综合治理经济效益分析模型……343
蓄水效率模型……343
流域滞时关系式……344
泥沙起动条件与卵石浅滩航道整治线宽度的计算公式……344
区域地下水系统模型……344
森林土壤涵蓄的水量模型……345
雨滴击溅在薄层水流侵蚀中的作用模型……345
稳定渠道几何形态解析模型……345
削减洪峰效率计算模型……346
中国西部降水资源的不稳定性模型……346
系统动力学模型……347
水资源利用综合效益评价模型……347
水面蒸发、温度和湿度计算公式……347
小流域降雨对土壤侵蚀模型……348
浮游植物光合生产力模拟……348

浮游植物气候生产力模拟 348
黄河下游断面形态与水沙输移关系模拟模型 349
河川径流与泥沙沿程曲线模型 350
流域系统的动力学机制公式 350
土壤侵蚀的坡度界测定模型 350
陡坡侵蚀产沙特点及含沙量过程计算模型 350
水流垂向扩散强度公式 351
枯季径流预报的自回归模型 351
减水减沙量模型 351
水文平衡方程 351
蒸发计算方法 352
黄河下游河流纵剖面平行抬升的统计检验模型 352
地下水位系统模拟预测模型 352
波浪冲蚀作用下淤泥质海岸剖面侵蚀演变模式 353
泥石流沟谷演化的不等时距灰色预测模型 353
溶蚀量的估算模型 353
山东临淄地区喀斯特-裂隙水资源的管理模型 353
流域拓扑预测及坡面减沙效益评判模型 354
月径流和月输沙集中特性模型 354
融冻泥流舌表面与前缘运动量公式 355
消融冰川表面能量平衡方程 355
Darcy-Weisbach 公式 355
最大负游程长概率分布函数 355
回归统计量 F 模型 355
玉米最大产量估算模型 355
年内不均匀系数模型 355
降雨径流因素及地面坡度对片蚀的影响模型 356
湿润半湿润地区水资源评估的水文模拟 356
地下水资源调节计算模型 356
沟道防护体系建设拦蓄效益模型 357
考虑随机输入信息的浅层地下水系统模型 357
江苏新沂市地下水开采的数学模型 358
枯水流量概率分布的数学模型 358
水沙耦合模拟模型 359
塔里木盆地陆面水文模式 360
影响水土流失因子间量纲和谐模型 360
国内小流域综合治理规划方法 361
基于栅格数据的流域降雨径流模型 361
两种理论方程的比较模型 362
河型转化公式 362
滞后效应及其对 SPAC 中水流运动影响模型 362
物质纵向输移公式 363
泥沙解吸重金属污染物动力学模式 363
冰川作用流域能水平衡的径流模拟计算公式 363
IHACRES 模型 364
小流域水土保持综合治理优化规划模型 364
水土保持规划中的系统动力学模型 364
沙地草地土壤水分平衡模型 364
湖流模型 365
降水推算方程 365
坡度与坡面侵蚀的关系模型 365
风蚀水蚀交错带侵蚀能量特征模型 365
含沙量传感器 366
苏北低地系统响应 366
水文线性模型 366
水资源变化趋势预测模型 366
黄河下游泥沙淤积的经验统计关系式 366
黄淮海地区土壤水分动态模拟模型 368
相似度指标 368
小流域降雨侵蚀产沙模型 368
水资源财富代际转移模型 368
河流纵剖面与相应坡降的关系模型 368
长江水系沉积物重金属含量变异函数 368
侵蚀产沙系统模型 369
长江水情的数值模式 369
供水约束方程 369
集水技术与林木生长的土壤水环境模型 369
雨水集流面模型 370
黄河下游引黄灌区水价域水资源调控模式 370
坡面措施减水减沙效益计算模型 370
供求定价模型 371
空间自相关与分形方法 371
人为水土流失各因素危害排序 371
流域水沙统计模型 371
黄河断流变化规律 372
坡面径流冲刷及泥沙输移的计算 372
水土流失治理与水土保持效益模型 372
天然降水和径流降水中四种微量元素的测定模型 373
削减洪峰流量效益模型 373
水资源风险管理模型 373
饱和水压传导率 374
实际浸润线方程 374
湿地水文模型 374
侵蚀产沙量模型 375
浅层地下水资源合理开发模型 376
苏州河水质模型 376
水循环模型 376
降雨入渗和坡地产流模型 377
超渗产流计算模型 377
流域枯水资源量的估算模型 378
黄河中游小流域坡沟侵蚀产沙量计算公式 378
坡流类型及坡地水力侵蚀计算方法 378
影响月径流的主要因素分析方法 378
河流与含水层水力耦合模型 378

月径流模型 …… 379
水资源损失估算模型 …… 379
集流量模型 …… 379
太湖流域水文模拟 …… 379
溢洪道陡段侧墙高度优化设计计算公式 …… 380
Liapunov 指数谱 …… 380
水资源利用的边际效益分析原理与计算方法 …… 381
年均输沙率模型 …… 381
径流演变的趋势性计算公式 …… 381
泥沙输移比的时空变化模型 …… 381
径流预测模型 …… 382
水资源完全成本定价的理论模型 …… 382
水土资源平衡研究的基本原理 …… 383
产沙经验公式 …… 383
水土流失计算与预测模型 …… 383
枯水分析模型 …… 383
潮汐河网水动力与水质数学模型 …… 383
未来气候情景下月降水量的概率模型 …… 384
气候风险指标的计算模型 …… 384
异常雨涝指标的计算模型 …… 384
水流数学模型 …… 384
小流域雨水资源化理论潜力计算方法与评价模型 …… 385
水窖建设工程规划模型 …… 385
旱地水窖设计参数的确定模型 …… 385
黄河断流严重程度的识别模型 …… 385
可供水量概念及计算方法 …… 386

第十一章 植被 …… 387

用管状日射表测量植物间辐射的模型 …… 387
截雨系数 …… 387
亚洲东部树线高度与纬度分布的关系模型 …… 387
红松林和采伐迹地的水量平衡分析模型 …… 387
植物物候期分析公式 …… 387
植被干扰指数 …… 388
禾草的水分利用、叶片角度和平直度的机理模拟 …… 388
水分从土壤经过植物体到达大气的传输模型 …… 388
湿模式实验数值模型 …… 388
水文-植被混合模型 …… 389
林地覆盖类型转换模型 …… 389
植被孤岛的种子散布模型 …… 389
总样地类内离差平方模型 …… 389
植被类型的分布与气候的关系模型 …… 389
气孔和冠层传导力模型 …… 390
刺槐对降雨的截持作用模型 …… 390
Log-线性模型 …… 390
次生林类型判据模型 …… 390
相似系数法 …… 390
林木生产力指数 …… 390
树冠截留量的模拟方程 …… 390
改进的 Penman 公式 …… 391
人工种草地产量估算模型 …… 391
最优轮伐期模型 …… 391
矮蒿草草甸植物蒸腾系数 …… 392
可能蒸散 E_0 与月均温 T 的关系模型 …… 392
树木生长对于气候和前期生长的响应函数 …… 392
中条山地区表土花粉的回归分析方程 …… 392
Thamthwaite Memorial 模型 …… 393
筑后模型 …… 393
数据变换模型 …… 394
一年以上植株茎的年生产量 D_S 模型 …… 394
植被系统数学模型 …… 394
植物气候生产力模型 …… 394
蒸腾强度与水量平衡模型 …… 394
沙棘林地上净初级生产量 P_n 模型 …… 394
林地水分条件与生产力模型 …… 394
刺槐生长季节蒸腾耗水量 E_W 模型 …… 395
半球直接反射系数因子的计算公式 …… 395
林冠截留量 I 模型 …… 395
林木蒸散耗水量的气候估算公式 …… 395
生长季节内油松的总蒸腾耗水量 E_W 模型 …… 396
花粉分析公式 …… 396
草本生物量的预测方程 …… 396
Kappa 统计模型 …… 396
水分为限制因子的草地优化收获理论模型 …… 396
蒸腾速率 T 模型 …… 397
水量平衡模型 …… 397
表面去除负荷 P_s 模型 …… 397
最大截留率模型 …… 397
林地生产潜力模型 …… 397
优质牧草产草量与气象条件的关系模型 …… 397
热带优质牧草越冬寒害指标 …… 397
温带优质牧草越夏高温指标 …… 398
自然植被净第一性生产力的估算与分布模型 …… 398
人工降雨小区内的水量平衡模型 …… 398
叶子重量损失与叶子氮素浓度变化关系模型 …… 398
雨滴当量射程计算公式 …… 398
人工草地生产潜力 y 的估算模型 …… 398
水热模式 …… 399
林木发育节律模型 …… 399
植物对大气污染反应的机械论分析模型 …… 399
整体间隙率 …… 399
糙率系数 …… 400
水分平衡模型 …… 400
森林植被带三维空间分布规律的经验方程 …… 400

林木分布度 …… 401
常绿阔叶林永久样地的非线性排序模型 …… 401
林冠对降雨势能的减少量 ΔE 模型 …… 401
自然植被净第一性生产力模型 …… 401
影响力函数 …… 401
杉木人工林水热优化模型 …… 401
区域蒸散模型 …… 402
垂直自然带在青藏高原东南部分布的数学模型 …… 402
中国植被净初级生产力计算公式 …… 402
东北阔叶红树林全球气候变化响应分析公式 …… 402
气候-森林响应动力学模型中的生物过程方程 …… 403
植被净初始生产力的 Uchijma 模型 …… 403
冠层表面阻力与环境因子关系模型 …… 403
平方差模型 …… 404
有序样方聚类模型 …… 404
山区气候的立体性与农林牧的分层模式 …… 404
低效防护林改造的水文效益模型 …… 404
甜槠林水文学效应模型 …… 404
植被类型分布与土壤类型关系的分析模型 …… 405
基于 NOAA 时间序列数据分析模型 …… 405
典范主分量分析迭代方程 …… 405
火炬松单位叶面积的蒸发速度 (E_{Cd}) …… 405
CO_2 和 N 对荷兰沙丘植被的历史模式影响模型 …… 405
植被双向反射模式及其反演模型 …… 406
从 AVHRR -GAC 数据时间序列中获取烧过面积的算法 …… 407
NEWCOP 模型 …… 407
蒸腾强度 T_r 计算公式 …… 408
植物光合生产力与冠层蒸散模拟模型 …… 408
森林采伐率的计算公式 …… 408
农田耗水量 ET_c 模型 …… 408
土地覆被的气候预测模型 …… 408
紫花苜蓿根系生长及吸水规律模型 …… 408
植被所吸收的光和有效辐射比例模型 …… 409
植被净第一性生产力(NPP)模型 …… 409
FAO 生产潜力模型中基本参数的修正模型 …… 409
荫蔽度模型 …… 410

第三篇　人文地理学

第十二章　工业地理 …… 413
工业布局与宏观环境模型 …… 413
我国工业布局的变化趋势分析公式 …… 413
总运费最小的物资调运数学模式 …… 413
工业成组布局经济效果及最佳规模优化模型 …… 414
综合体的控制模型 …… 414
一致性指标模型 …… 415
农村能源需求预测模型 …… 415
区域发展规划中的系统动力学模型 …… 415
陆地再生能源资源的计算模型 …… 415
模糊综合评价模型 …… 416
澳大利亚制造业变化分析公式 …… 416
工业布点的最优区位值计算公式 …… 416
油田开发区水体的非点源石油污染测算公式 …… 416
行业空间配置的线性对偶模式 …… 417
石油开发生态环境影响评价模型 …… 417
沱江地区风能的估算模型 …… 418
区际商品率指数 …… 418
区域矿产资源承载能力分析模型 …… 418
风库风能、功率的确定方法 …… 419
农村工业重心转移轨迹分析公式 …… 419
垃圾中甲烷产率计算模型 …… 419
矿产资源经济指数计算公式 …… 420
矿产资源开发管理模型 …… 420
暴雨洪水分析的设计模型 …… 420
矿产资源战略开发综合决策的模糊优选模型 …… 420
税前利润的一定服务年限内开采整个矿体地质储量获得最大优化模型 …… 420
矿山资产评估模型 …… 421
集水区总流失量 A 模型 …… 421
可再生能源资源的系统评价模型 …… 421

第十三章　农业地理 …… 423
温度差值公式 …… 423
农作物种植密度与小气候关系式 …… 423
集成的土壤水亏缺模型 …… 423
蒸发作用(E_m)估算模型 …… 423
农作物树冠的热力平衡方程 …… 424
黄土坡耕地水土流失计算公式 …… 424
蒸腾作用模型 …… 424
农作物种植中产量/密度响应的数学关系式 …… 424
净辐射和土壤热力流模型 …… 424
农作物的向下净长波损失(L_d)模型 …… 425
鲍恩比率和平流能量模型 …… 425
植物植冠的风剖面-分析模型 …… 425
农作物特性同化作用与蒸腾作用比率模型 …… 425
井渠结合供水模型 …… 426
鲢鳙渔产力模型 …… 426
小麦蒸发作用中叶面水势模拟模型 …… 426
农田土壤水分状况的估算模型 …… 426
干燥度的计算式 …… 426
作物最大生产力模型 …… 427
坡地与水平梯田湿润状况的气候学分析公式 …… 427

套作玉米系统的数学模型 427
光合速率 P 与气孔数的正相关模型 428
套作玉米系统与农作物生长过程的数学模型 428
两种种植方式的光合潜力计算模型 428
质量综合指数 P_m 模型 429
水稻的光温气候潜力模型 429
土地等价率(LER) 429
温室加热量与换气量的计算公式 429
水资源开采利用量模型 430
粮食作物的生产潜力与粮食生产的稳定性模型 430
灌区水量供需平衡模型 430
主要粮食品种矿质元素观测值分析模型 430
小麦产量(y)与绿度(g)的关系 431
氮预算模型 431
水稻的气候土壤生产潜力估算模型 431
优先选择比 431
叶片与周围空气的对流热 A 的模型 431
划分农业区的判别函数 432
蝗虫对麦茬地中小麦损害的模拟模型 432
农业旱涝指标的计算模型 432
粮食作物生产潜力的估算 433
农业生态经济系统的投入产出分析模型 433
虫害动力学的仿真模型 434
牧草产量预报中的综合决策模型 434
农业生产结构最优化方案的线性规划模型 434
求某一重现期的极值公式 434
作物最佳结构研究模型 435
农田水分盈亏量的估算模型 435
预测水应力对臭氧引起农作物减产的响应模型 435
资源替代策略的系统方程 436
土地生产潜力指数 436
柑橘产量模型 436
基本农田建设类型分区的分析模型 436
区域土地质量系数 436
叶片气孔传导力模型 436
积温的距离系数 436
水资源盐度控制模型 437
臭氧与水应力的相互作用模型 437
喷灌的节水效益模型 438
作物冠层的蒸腾量估算模型 438
热带作物农业气候条件适宜度分析模型 438
海河平原农业供水的决策分析模型 439
土地利用最优结构模式 440
降水评价加权平均方法 440
农业生产系统的动态模拟模型 440
沟畦灌溉水流运动的数学模拟 440
作物气候生产潜力计算公式 441
灰色 GM(1,1)预测模型 441
营养元素平衡状况度量模型 441
渔业生产结构的优化模型 441
运动波沟灌数学模型 442
干旱和半干旱地区农田灌溉的规划模型 443
海南岛热带作物多目标规划模型 443
第一性生产潜力估算 444
土地生产潜力评价模型 444
粮食作物水分盈亏分析模型 444
人-粮-地关系的中环公式 444
价值函数 $V(y)$ 444
灰色预测模型 445
小流域水土保持优化模型 445
干旱缺水条件下麦田蒸散量的计算方法 445
充分灌溉条件下的作物最大产量 Y_{me} 445
农田水量平衡方程 445
作物生长与水分利用率的计算模型 446
立地对主要造林树种的宜度评判模型 446
长白山区人参高产栽培模型 446
农作物水分平衡简化模型 446
农业气候指数 447
农业自然生产潜力模型 447
冬小麦生产力估算模型 449
水资源仿真系统模型 449
生产潜力模型 449
杂食性动物的饲料配方模型 449
模糊优势和模糊聚类模型 450
生态气候因子对稻米品质影响的评价模型 450
实际光能利用率模型 450
农业生产潜力模型 450
潜在光能利用率模型 450
土地适宜性划分指标 451
大气水势 $\psi_{w.v}$ 模型 451
水土平衡模型 451
山地经济林适度规模经营的决策模型 451
粮食产量及粮食产量变率计算公式 451
有效田间灌水质量指标测度模型 452
咸淡水地区种植结构优化模型 452
玉米生物生产力 P_b 模型 454
农业类型区划分模型 454
安徽大别山南麓柑橘冻害分布模式 454
耕地生产潜力模型 454
农业生产潜力的相关模型 455
南部山区冬季气候模糊聚类分析模型 457
水稻产量与产量变异系数模型 457
土地生产潜力 $P(Q,T,S)$ 模型 457
生产力指数 I_p 457

土地生产潜力和人口承载力的计算模型 …… 457
非耕地上的杂草模型 …… 458
杂草与农作物的相关模型 …… 459
资源可用性指数计算模型 …… 459
土地生产潜力(Y_S)模型 …… 459
土地适宜性评价模型 …… 459
土地退化模型 …… 459
农户生态系统综合评价 P_i 模型 …… 460
Weaver 组合指数 …… 460
农业系统生产力指数 I_{ASP} 模型 …… 460
持续农业的评价模型 …… 460
寄生物密度 P 和寄主物密度 N 的二元寄生模型 …… 460
可能商品量预测模型 …… 460
农田灌溉时量优化模型 …… 461
农田热量、水量盈亏计算公式 …… 462
旱涝指数计算公式 …… 462
作物灌溉用水动态优化配水模型 …… 462
T_{c-u} 与冬小麦生长的关系模型 …… 462
作物适宜度指数 …… 462
山区垂直农业气候分层模型 …… 463
农作物减产量的计算公式 …… 463
农业灾情模型 …… 463
气候生产潜力模型 …… 464
农田水量平衡模型 …… 464
农业持续发展相关模型 …… 464
土地调整结构模型 …… 465
山区农业资源开发的准则模型 …… 465
土地类型结构分析公式 …… 465
太湖流域水体潜力预测模型 …… 466
粮食产量模型 …… 466
生态农业区域划分模型 …… 466
农作物生产潜力 Y 的估算公式 …… 466
茶叶生产基地综合评分法 …… 466
蒸散量模型 …… 466
种植业生产波动指数 …… 466
田坎侧向蒸发损失量 W 模型 …… 467
适宜高度模型 …… 467
春小麦产量最优设计模型 …… 467
旱作产量潜力模型 …… 467
农作物产量的 DAISY 模型 …… 467
CERES-小麦模型 …… 467
空间分布数据配平中国稻田中的碳预算模型 …… 468
土地开发利用潜力分析模型 …… 468
农地生产潜力分析模型 …… 468
土壤蓄水量模型 …… 469
农地的适宜性模型 …… 469
土壤环境保护模型 …… 469
线性规划模型 …… 470
土地资源配置数学模型 …… 470
人口-土地-农产物的关系模型 …… 470
“强排强灌”的分析模型 …… 470
农业用地需求预测公式 …… 471
干旱与半干旱地区土地生产潜力的测定模型 …… 471
中国粮食产量预测方程 …… 471
气候生态适应性隶属度函数 …… 472
作物耗水量 E_r 模型 …… 472
能量产投模型 …… 472
土地价格 P 模型 …… 472
陆地水分平衡模型 …… 472
麦田能量转化和水分传输模型 …… 473
土地利用程度综合指数 …… 473
ARID CROP 模型 …… 473
宁夏南部山区春小麦生产潜力计算模型 …… 474
玉米生长条件下农田土壤水分动态预报模型 …… 474
欧式距离 $L(X_i, Y_j)$ 模型 …… 475
总产量年际变化 ΔTY_i 模型 …… 475
麦田蒸腾需水量公式 …… 475
辐射收支、热量平衡方程 …… 475
作物蒸腾公式 …… 475
冬小麦水分利用效率 …… 476
可持续农作物产量模型 …… 476
潜在土壤蒸发模型 …… 476
作物水分利用效率模型 …… 476
耕地重心和生态背境质量指数 …… 476
农业化肥氮磷钾需求比例分析模型 …… 477
地价比照法(标准田法) …… 477
水土保持经济效益分析模型 …… 477
农业气象灾害风险度模型 …… 477
农业水资源的优化空间配置模型 …… 477
粮食总产多年平均增产率的计算公式 …… 479
小流域系统环境人口容量分析与评价模型 …… 479
坝坡开发利用可行性论证 …… 480
灌溉定额模型 …… 480
效益指标动态模型 …… 480
界区截水沟末端的设计流量 Q_p 模型 …… 480
节水农业作物布局空间决策模型 …… 480
小流域治理综合效益评价模型 …… 480
荒地资源开发对于粮食的影响模型 …… 481
主要农业资源利用效率模型 …… 481
非农业建设占用耕地预测模型 …… 481
农业科技进步贡献率计算模型 …… 481
粮食灾损量的估计模型 …… 481
小流域泥沙来源及其动态变化的 ^{137}Cs 法 …… 481
杂草密度预测模型 …… 482

农业水资源供需状况评价方法……482
滇东北山区坡耕地土壤流失方程……483
温度对玉米生长和发育综合影响的评价模型……483
作物光温生产力模型……483
农耕地地价评估公式……484
生态经济分区的距离系数模型……484
农田林网经营模式效益评价……484
旱作地膜带田的集水调水效应水分平衡模式……485
农业水资源的供需模拟模型……485
渠道工程体系费用、能耗及占用土地面积计算……485
地下暗管灌溉工程体系引灌费用计算公式……486
引灌费用、能耗及占用土地计算模型……486
井灌费用及能耗计算模型……486
非饱和土壤水扩散率 $D(\theta)$模型……486
草场生态经济效益现状分析模型……487
治理效益评价模型……487
气候生产潜力 Y_C 模型……487
土壤水资源 W_{SR} 计算公式……487
水量平衡方程……487
灌区的综合指标值 S……487
矿区废弃土地复垦潜力评价模型……487
渔业资源配额微分对策模型……487
农业生态气候系统的模糊动态模型……488
一致性系数的计算公式……489
土地生产率综合评价指标……489
高寒草地生产潜力模型……489
饱和导水率 K……489
泥浆泵复垦土壤生产力的定量评价……489
光合潜力 P_f 指数……489
旱田水分供需平衡模型……489
异常干旱气候事件及其对农业影响评估模式……489
水资源承载力评价模型……490
土地资源利用结构优化模型……490
黄土丘陵林区开垦地土壤抗冲性分析模型……490
中国城乡经济投入占用产出分析模型……490
土地资源开发的生态效益评价模型……491
土地利用的最大似然判别法分类公式……491
粮食生产中的风险分析模型……491
多指标权数的求解……492
生态不安全指数……492
土地利用的时空变化分析模型……492
山地土地类型质量评价模式……492
旱作产量潜势的计算公式……493
土地利用优化配置模型……493
土地资源可持续利用的评价模型……493
面积-周长的分维关系……493
土地利用结构的特征指标……494
土地利用结构、特征时空变化分析模型……494
坡耕地退耕模型……494

第十四章 交通地理……496

产销区划分析公式……496
交通吸引范围及其模式……496
区域客流分布模型……497
运输系统的区域效应模型……497
吉尼系数计算公式……497
交通网络分形特征的三种基本分维数计算公式……497
长江下游港口体系职能结构的分析模型……498

第十五章 城市地理……499

均质地域的均质度公式……499
两个城市的基于能量成长模型……499
商业中心分类(聚类分析中斜交空间的距离公式)…499
各省区因子分数公式……499
城镇等级体系不平衡指数(S)通用公式……499
城市地域结构的潜能模式……500
集镇的服务范围计算公式……500
城镇体系的有关模型……500
城市间信息作用的系统分析模型……500
地-气交界层内能量平衡方程……500
多元统计分析法……501
各个市镇对其他所有市镇的交互引力公式……501
城乡再生产模式……501
城市土地综合经济评价方法……501
城市综合实力指数……501
城市热岛强度回归方程……502
城市水供需动态系统模拟模型……502
城市生态位评价分值 P……502
土地类型结构分析模型……502
范力农定理……503
城市基准地价扩散方程……503
城市投资环境的评价模型……503
城市居住人口密度估算模型……504
投资环境的熵值计算公式……504
城市犯罪区位选择的数学模拟……504
乡村市场销售总量模型与市场区划分方法……504
城市空间结构的自组织模型……505
修正的主成分分析法……505
建筑期间河流沉积量 Q_s……505
模糊加权综合指数Σ Q……505
城市可持续发展动力学模型……505
城市人地系统综合评价模型……506
城市水环境承载力指数……506
城区土地定级模型……507

城市廊道预测模型 507
城市节水潜力估算模型 507
城市体系 KOCH 雪化模型 508
乡村性指数计算模型 508
城市网络功能的度量指标 508
中心地体系的替代性分析公式 508
城镇体系空间结构的分形维数及其测算 508
城市标准地块线性分布计量模型 509
约束性单元自动演化 CA 模型 509
区位商公式 509
地价 P 模型 510
城乡聚落动态变化的维数公式 510
城市可持续发展的综合评价模型 510

第十六章 旅游地理 511
公园中游客行为的 Markov 模型 511
室外娱乐需求分析模型 511
旅游地引力模型 511
旅游地开发评价模型 512
有效温度 ET 模型 512
游憩者流动的重力模型 512
旅游需求模型 512
泰山旅游环境承载力利用强度分析模型 512
城郊游憩活动的效益模型 513
风景区景观空间格局分析模型 513
旅游开发对植被的影响评价指标 514
旅游地客源市场的距离衰减模式 514
风景名胜区与城市间的空间相互作用模型 514

第十七章 区域地理 516
生产力布局线性规划模型 516
水资源数量的估算模型 517
区域分析公式 517
动态投入-产出模型 518
区域发展可更新资源的最大化函数及运动方程 518
地域分工与区位优势分析公式 518
国土规划控制模型 519
区域分析模型 519
投资折算模型 519
地区或流域可利用的水资源总量计算模型 519
物流场模型 520
商业中心的区位格局及优势度分析模型 520
资源评价指标模型 520
人口扩散与空间相互作用模型 521
商品购销地域分布的计算公式 521
洪水经济损失敏感度分析计算公式 522
乡村功能类型及其地域模式 522
经济区总量增长的计算公式 522
增长极理论分析及选择模型 522
区域差异指数的计算公式 523
结构变动因素对能源消费增长的影响模型 523
区域开发的理论模式 523
水资源协调管理的交互式模式 525
地区自然资源优势比较模型 528
模糊 ISODATA 迭代计算方法 528
区域系统分析的逻辑斯谛方程 528
人口预测模型 528
区域差异合理值计算公式 528
不平衡指数计算公式 529
洪泛平原农村居民地空间分布特征模型 529
区域国土资源评价的系统分析模型 529
耕地生产潜力修正模型 530
区域土地生产潜力 Y 模型 530
Logistic 曲线方程 531
区域人地相互作用的综合潜力模型 531
社会需求分析的 Working 模型 531
外商直接投资的区域分异模型 531
区域规划模型 531
外商投资与沿海地区经济增长的定量分析模型 531
水资源可持续发展利用规划的耦合模型 532
水资源可持续利用的多目标线性规划模型 532
成本及效益模型 533
可持续发展代际公平模型 533
最低水循环成本计算方法 533
环境污染计算方法 533
单位面积社会资本的测算公式 534
区域可持续发展水平及空间分布特征模型 534
自然资源消费需求生命周期规律 534
经济全球化分析方法及指标计算 535
坎德尔秩次相关检验法 535
水资源财富代际转移模型 535
黄土高原地区可持续发展评价模型 535
距离衰减模式 535
区域水环境经济系统结构优化模型 535
土壤侵蚀区位熵 L_i 536
区域资源优势的定量评价模型 536
小流域综合治理效益分析模型 537
地下水资源承载力分级的综合评分值 α 537
区域承载力与承载状况的定量描述 537
流动人口空间分布的空间自相关分析模型 538
可持续发展指标体系的能值分析模型 538

第四篇 生态学

第十八章 生态学的一般理论与方法……541
植物生长模型……541
空气动力学阻力和风速的关系模型……541
氮和光的系统分析模型……541
叶面能量平衡模型……541
生物生产量的基本概念及其研究基本途径模型……541
动态模型中的参数算法……542
初级生产力分段线性模拟模型……543
生态建模的整体分析方法……543
J.W. Forrester 世界动态模型……543
倍增灵敏度分析模型……543
SO_2 干燥沉积与草原硫循环的关系模型……543
模型的可靠性指数……544
基于回归的非线性分解模型……544
太阳辐射的计算方程……545
多元灵敏度的运算法则……545
生态学中的奈曼 A 型分布模型……545
海水中叶绿素的测定方法……545
土壤动物的采集和调查的数学模型……546
环境状态矢量的空间模型……546
地下生产模型……546
生态建模中的弹性数学模型……546
生态位的定义及计测生态位重叠的改进公式……547
冬小麦生长率及麦田能量收支分析模型……547
人工林水量平衡的计算方程……547
模糊度 $D(\underset{\sim}{A})$模型……547
数学模型的清晰度、精确度指数……547
吻合度检验模型……548
植物中资源冲突的空间分析模型……548
吉良热量指数……549
重要值—面积曲线模型……549
净当前价值(NPV)的计算公式……549
两个生态环境相似性计算模型……549
初级生产估算模型……550
Holling-Ⅲ型功能反应新模型……550
斐波纳契搜索模型的目标函数……550
死亡密度函数……550
岛屿生物地理学理论模型……550
地面辐射平衡方程……551
关于 Taylor 幂法则的统计学模型……551
池塘能流模型……551
生态场理论模型……551
精细刻画函数与粗糙刻画函数的转化模型……551
生物学变量的响应模型……552
捕食者-被捕食者模型……552
生物稳定塘平衡方程……552
主要优势植物分解速率和损失率的计算模型……552
^{89}Sr-Sr 在田表水、表土及水稻植株种滞留浓度与时间的关系模型……553
水分胁迫积分(WSI)模型……553
森林渐近特征估算模型……553
模拟的效果指数……553
比较模型中预测值的验证模型……553
降维的生态梯度轴模型……554
生物量回归模型……554
改进的生态位分离测度模型……554
大气沉积过程的沉积速度……554
资源消耗的生态价值系数评估模型……554
土壤水平衡、氮行为和生物量组分的模拟……555
自相关指数的空间模型……555
生态网络中物质、能量流动的时间链分析模型……556
浮游生物季节变化的模拟模型……556
多目标最佳可持续利用模型……557
Bap 传输数学模型……557
灵敏性和种别性的统计计算模型……557
信息碎片的维度计算模型……557
生态学中的逐步聚类模型……557
土壤微生物生物量的测定模型……558
空间分布型与时空相关模型……558
生态位的态势理论模型……558
Meta 分析模型……558
植物种群与群落结构动态分析模型……559
绿洲水热平衡-实际蒸散模型……559
森林生态系统根系生物量的 *PFR* 模型……559
FORCLIM 的四个修正模型……559
大尺度森林碳预算的误差分析模型……560
SPAC 水分热力学函数计算……561
中国村级生态系统长期变化的统计分析模型……561
生物指数的计算公式……561
生态地理区域系统界线划分的物元模型……561
水的酸性中和能力 (ANC)……562
森林净初级生产量的测定模型……562
纯林自然稀疏分析模型……563
集合种群动态理论模型……563

第十九章 个体与生理生态学……564
树冠下农作物光合作用和二氧化碳流理论模型……564
光照叶片面积指数……564
水蒸气和 CO_2 扩散的植物阻力模型……564
叶绿素基础(E_c)上的净同化作用率……565
植物个体的叶面积和总干重模型……565

平均根需求量系数 …… 565
与根的数量有关的土壤阻力理论估算模型 …… 565
不同天气状况下蒸腾作用率的计算公式 …… 565
净初级生产模型 …… 565
西特喀云杉的光合作用模型 …… 566
叶片的蒸腾作用模型 …… 566
植物的生长和呼吸作用模型 …… 566
水分传输的增长和水分利用模型 …… 566
黑麦草和大麦的根和空中部分暗呼吸作用模型 …… 567
年龄和天气对产卵的影响模型 …… 567
TELOC 模型 …… 567
净初级生产力(*NPP*) …… 567
森林食叶昆虫密度的动态模型 …… 568
Nicholson 模型及其同源微分方程 …… 568
基于相对生长率的仿真模型 …… 568
Ludwig-Jones-Holling (LJH)立地模型 …… 569
植物生长过程模型 …… 569
昆虫发育速率与温度关系的数学模型 …… 570
小叶锦鸡儿灌丛地上生物量的预测模式 …… 570
金边土鳖增长能力 r_c 指数 …… 570
食叶昆虫生长的数学模型 …… 570
莫诺模型 …… 571
混生林演替模型 …… 571
云南松同化器官数量垂直分布统计分析模型 …… 571
鼠兔日食量干重 *F* 模型 …… 571
污染物质积聚的阈值模型 …… 571
林冠抑制光合作用的数学模型 …… 572
根的深度及永久萎蔫点的间接测定模型 …… 572
南方松树甲虫生长的生物物理模型 …… 572
盐沼碳循环模型 …… 572
稻氯曲菌素侵袭的生态系统模型 …… 573
多年生禾草对落叶反应的模拟模型 …… 573
改进的 IWAO 模型 …… 573
模糊相似优选比模型 …… 573
相关系数 *r* 和剩余回归标准差 *SD* 模型 …… 573
棉田内棉铃虫卵分布型参数特征 …… 573
枝条的死亡与根系死亡指数 …… 574
相对生长率和绝对生长率模型 …… 574
棉铃虫卵估值抽样模型 …… 574
昆虫发育起点温度估值模型 …… 574
密度依赖性规律模型 …… 574
在树木个体中基于碳吸收和分配的立地生长模型 …… 575
地上净生产量估算模型(P_{an}) …… 575
棉铃虫卵及幼虫阶段的计算机模型 …… 575
种子发芽起点温度 *C* 及有效积温 *K* 指数 …… 575
发育起点温度 *C* 和有效积温 $\overline{K}$ 指数 …… 575
湖鳅生长特征和临界年龄模型 …… 576
再次改进的 IWAO 模型 …… 576
降雨量的即时和延迟影响模型 …… 576
规模分布的 Sinko 和 Streifer 方程 …… 576
活力指数 …… 576
芒萁植株浸出液对几种植物生长影响的检验模型 …… 576
生物个体的代谢模型 …… 577
冠层的光合作用模型 …… 577
最佳生长方程 …… 577
预测树冠叶面积指数 …… 577
浮游动物生物量模型 …… 577
净第一性生产力模型 …… 578
存活率(或卵化率)*y* 模型 …… 578
棉花生长发育模拟模型 …… 578
转移概率模型 …… 578
杉木火力楠混交林的气候效应模型 …… 578
叶片相对水分含量(R_{WC})指数 …… 578
生产力定量化的营养指数计算模型 …… 578
最大直径增长方程 …… 579
发育与温度的关系模型 …… 579
关于变温促进发育的酶学解释模型 …… 579
发育速率 *V*(*T*)模型 …… 579
油松毛虫幼虫抽样模型 …… 579
改进的 IWAO 抽样模型 …… 580
棉铃虫预测的回归模型 …… 580
丹顶鹤雏鸟生长发育模型 …… 580
Weibull 函数 …… 580
GM(1.1)模型 …… 580
CO_2 交换测量模型 …… 580
温度对萝卜蚜种群参数的影响模型 …… 580
鳑鱼生长规律模型 …… 581
新的养分效应数学模型 …… 581
森林植冠水分截留蒸发作用的直接测量模型 …… 581
大气中的 CO_2、气候变化和树木生长之间的
过程模型 …… 581
SPESS-同龄自然稀疏纯林分的模拟器 …… 582
森林对大气污染的反应模拟模型 …… 583
热带森林的营养梯度和空间结构-模型 …… 583
苹果棉蚜蚜小蜂生长发育过程模拟模型 …… 583
生存分析理论及其生命表格式模型 …… 584
Holling Ⅱ 功能反应模型 …… 584
温度与发育速率关系模型 …… 584
速生长量 V_{gc} 指数 …… 585
水草对土壤、水分和磷的保持值计算公式 …… 585
改进的叶生理模型 …… 585
草原和松林的碳平衡模型 …… 585
温度-湿度指数 …… 586
油松林的能量平衡模型 …… 586

铜与腐殖酸对小球藻生长影响的关系模型 586
浮游植物碳同化速率模型 586
南方鲇的最大摄食率模型 587
水分利用效率模型 587
n 个样点的生态梯度轴 E_{GAPC_j} 587
尖头塘鳢体长和体重的生长模型 587
综合生态效应 E 模型 587
叶日积 L_{ad} 模型 587
山地主要造林树种的生理生态学特性模型 587
水体某深度的太阳辐射强度 I_Z^λ 模型 588
温度与麦长管蚜的关系模型 588
个体长蜥蜴之间的相似系数模型 588
繁殖指数 I 模型 588
温湿度对发育速率及内禀增长力影响的模型 588
天然林中顶枯现象的模拟模型 588
媒介寄生虫的竞争模型 589
原始生物大分子动态模型 589
径流土壤-植物-大气的通量模型 590
Li-Strahler 几何光学林冠模型 590
菹草对营养盐的吸收速率(v) 590
MCHOG 模型 590
森林 CO_2 需求模型 591
浮游动物对浮游细菌的牧食力模型 591
在多维生态因子影响下的 IRM 综合速率模型 591
栎呼吸量的测定模型 591
土壤微生物生物量养分的计算公式 592
混合物分解和几何反射率模型 592
树叶量损失测定模型 592
土壤水分蒸发蒸腾损失总量的测定模型 592
藻类生长模型 592
任豆林的生物量和光能利用率测定模型 593
树冠再生过程空间模型 593
邻体干扰指数 593
土壤和蚯蚓体内重金属含量相关性测定模型 593
柑橘潜叶蛾发育速率模型 593
森林个体空间动态模型 594
繁殖模型 594
不同阈值下昆虫的二项式抽样设计模型 594
红松林动态模拟模型 594
昆虫发育速率与温度关系的复合数字模型 595
呼吸作用预测模型 595
单木竞争指数 595
新昆虫个体生长率 G 595
气孔开放的均匀程度模型 595
茅苎的光合特性及其对土壤水分的响应模型 595
干旱指数 596
竞争指数 596
碳循环分析模型 596
呼吸作用对温度和营养的反应模型 596
生态系统的净初级生产力的模拟模型 597
冠层水分含量 ct 的计算模型 597
邻体干扰指数 I 改进模型 597
度量克隆植物繁殖适合度的新公式 597
阔叶林的生物量扩展系数 597
树高生长模型 597
水稻生长动力学方程 598
耗氧率模型 598
埃迪协方差 598
微量气体通量预测的全球植被动力学模型 598
兼容性立木生物量模型 599
细根净生产力和周转率模型 599
个体繁殖贡献率模型 599
总体分枝率 R_b 599
抗张强度增量模型 599
克隆植物繁殖适合度模型 599
旗叶光合日总量 P_a 模型 600
红树林的间距、衰老及邻域竞争模型 600
森林动态过程模拟的林隙模型 600
空气中 CO_2 富集的条件下密林中气体交换、叶面氮与生长效率的估算模型 600
北极冻原景观中 CO_2 通量尺度测量的生理学模型 601
净光合速率 P_n 601
阶段死亡率 M 601
光合、暗呼吸速率模型 601
森林生长模型 602
木质部栓塞化生理生态效应模型 602
矩阵模型与扰动分析 602
Farquhar 光合作用模型 602
呼吸作用和环境变量之间的关系 602
小麦残茬落叶分解动态模型 603
反应指数 RI 603
模糊评价模型 603
食物生态位宽度与重叠度模型 603
对虾继饥饿后的补偿生长的计算模型 603
胃排空模型 603
紫花苜蓿根系吸水模型 603
生物量及相对生长率模型 604
响应指数 R_i 604
分枝率计算公式 604
浮游植物和初级生产力的摄食压力模型 604
第二十章 种群生态学 605
Lincoln 指数的贝叶斯修正模型 605
绿色生物量的净变化率模型 605

种群的动力学模型……605
沼泽鸢的基本生活史模型……605
物种竞争模型……606
Logistic 种群收获模型……606
差分模型和微分模型的算法一致性……607
对于活体树木的攻击过程动力学模型……607
种群向量模型及变维矩阵模型……607
种群增长的 Leslie 矩阵计算模型……607
带有时滞的双物种离散时间种群模型……608
种的数量模型……608
随机数学模型……608
常绿阔叶林的数量分类方法……608
桔全爪螨种群动态的模糊聚类分析模型……609
种群模型的扩展形式……609
定温条件下棉铃虫种群动态数学模拟……609
羊草种群地上部分生物量模型……609
种间冲突对物种个体产量的影响模型……610
周期性环境中收获种群模型……610
鹿种群的数学模型……610
优势植物种群竞争模型……611
藏系绵羊种群结构及其最优出栏方案模型……611
两个物种混合种植时的竞争模型……611
种群增长的 Logistic 方程……611
密度与拥挤度制约死亡率模型……612
P-Ⅲ分布的概率密度函数……612
多重时间延迟的种群增长模型……612
平均数的非线性动力学模型……612
枯叶年腐解率指数衰减模型……612
确定动态经济阈值的数学模型……613
种群动态模拟模型……613
有限空间中的种群生长模型……613
逻辑斯蒂方程……613
种群密度及生物量动态模型……613
林冠毛虫种群仿真模型……613
相同年龄段植物种群的时空演变模型……614
种群的高生长及生物量季节动态模型……614
植物选择性系数……614
种群密度对光的选择性模型……614
季节性生物种群消长的数学模型……614
崔-Lawson 种群模型……615
崔-Lawson 单种群模型……615
种群结构及其出栏方案分季最优化模型……615
Morisita 指数……615
四点式平均值法……615
种群增长模型……615
微分拟合建模——DM(1)模型……615
资源开发竞争模型……615
两者同时竞争的 De Wit 模型……616
种群生长的非线性模型……616
单物种模型……616
竞争模型……616
沼泽生态分类及其分布判别模型……617
一般谐波分析模型……617
种群生命系统的概率模型……617
空间格局和一维格局的数学模型……617
泡桐对小麦的生长发育和土壤水盐含量影响的统计分析模型……618
蚕豆蚜种群动态与蚕豆生理变化的关系模型……618
种群变动和生产量测算模型……618
种群内禀增长力及捕食功能反应模型……619
种群空间分布型及其混合种群抽样模型……619
东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度模型……619
菲律宾蛤仔的种群动态模型……620
岛屿生物种群模型……620
优势种生物量及第一性生产力模型……620
种群的空间动态分析模型……620
种群动态模型……620
动物种群密度模型……620
种群生长的复合生长类型……621
种间竞争模型……621
麦蚜种间竞争模型……621
生态位重叠模型……621
天敌之间"误杀作用"的种群数学模型……621
复杂系统的种群动态模型……622
种群聚集均数 λ 模型……622
Logistic 方程模型……622
种群调节与竞争模型……622
小群优化结构的分析模型……623
初始种群密度和最终种群密度之间的关系模型……623
温度对种群的影响模型……623
逻辑斯谛方程模型……624
种群密度与生物量动态模型……624
油松种群自然更新模型……624
单种群增长的动态模型……624
七星瓢虫分布型的判定模型……624
种间关联度 χ^2……625
环境变化下的种群模型……625
种群密度动态模型……625
谐波模型……625
水稻 leaf-folders 的种群动力学及其与水稻相互作用的仿真模型……625
物种群丛的能量定律……626
种群增长的必要条件……626
食蚜绒螨和棉蚜的聚集差异……626

自回归和非线性回归并联混合回归模型……626
种群无性系生长格局分析模型……626
棉田施药后棉蚜种群动态模型……627
模糊数学排序模型……627
主要水分渗透和综合抗干旱指数……627
地块连通性和排列对动物复合种群动力学的影响模型……627
草原生态系统狭翅雏蝗种群的能量动态模型……627
慈竹的热值 Q 模型……628
生态位重叠模型……628
两个生理上相同的物种的模型……628
繁殖种群生物生产量模型……628
九华山土壤动物垂直分布的计算公式……628
慈竹克隆种群各样品的燃烧热 Q 模型……629
物种更替模型……629
种群生物量的测定模型……629
典范指示种分析模型……629
波动环境中定期捕杀的种群的平衡保持模型……630
胸径分布的拟合检验模型……630
杂草的生态经济阈值模型……630
优势种群间联结性测试模型……630
有效种群规模和种群统计模型……631
出生-死亡-灾难模型……631
单种种群生态的数学模型……631
种群能量动态模型……632
头盔蜜雀的灭绝动力学模型……632
污染状况下增长率 $r(C)$ 计算模型……633
树种群模型中的温度影响模型……633
亮叶水青冈种群遗传多样性模型……633
Gini 系数……634
种群分布密度……634
包容生态因子的广义 Logistic 模型……634
种群灭绝时间预测模型……634
种群持续时间的估算模型……634
大头茶种群的幼苗群、幼树群和成年个体群间盖度模型……635
生殖值 V_x……635
种群增长模型的广延 Logistic 模型……635
生态位宽度与生态位重叠模型……635
种群分布格局分析模型……636
玛他种群遗传模型……636
人工林种群最优密度决策模型……636
反曲原甲藻种群变化率动态模型……636
杉木种源胸径生长地理变异规律……637
不整齐性指标及遗传学分析模型……637
邻近的灌木丰度测量……637
种群偏离度与种群扩散率的估计模型……637
种群传播模型……638
迁移的种群模型……638
种相似与属相似系数……638
能量固定与能量吸收特征模型……638
耦合映像格子模型……638
林分密度效应动态模拟模型……639
种群遗传模型……639
种群数量增长速度模型……639
偏倚度 G……640
种群间联结关系模型……640
雌性个体与任一雄性至少交配一次的概率……640
发育历期模型……640
种群时空预测模型……640
Lotka Volterra 竞争模型……641
生态系统生产力模型……641
植物群丛尺度上的碳分配与干物质生长模型……641
物种相似性指数……642
物种-地区之间的关系模型……642
落叶松种群格局的分形模型……642
谱分析模型……642
Meta-种群结构及其遗传后果模型……642
种群可持续增长区数学模型……642
种群数量及其增长的数学模型……643
种群密度模型……643
密度依赖和种群增长函数……644
生物学控制的复合种群模型……644
金雀花种群动态模型……644
种群扩散仿真模型……644
银鱼种群数量变动的数学模型……645
棉蚜种群寄主转换的适应和变异规律模型……645
空间自相关分析……645
种的生态位适宜度 *NF* 指数……645
生殖价 V_x……645
L-Logistic 模型……646
物种数模型……646
生态位宽度和重叠模型……646
种间竞争指数……646
确定关键种的模型……646
群的空间分布格局与环境的关系模型……647
生态位的测度模型……647
优势树种生态位测度模型……647
棉铃虫发生量预报模型……647

第二十一章　群落与生态系统生态学……649

水平植物群丛中的光线测定模型……649
热带生态系统中的太阳辐射和生产力模型……649
取样数目估计模型……649

植物群落信息分析模型……649
CONIFER 模型……649
光合生产力 Y 指数……650
线性营养物循环模型……650
相似系数模型……650
森林生态系统的能量流动模型……651
有蹄类动物系统的最优模型……651
生态系统中流的分解与能量最小损耗原理……652
灵敏度分析模型……652
一年生植物竞争模型……652
复杂生态系统模型……653
生境适宜性指数的计算模型……653
典型生态系统中的符号稳定性定义模型……653
复杂生态系统达到稳定平衡时的物种数量测定模型……654
能量和熵平衡的初级生产量、呼吸作用和放牧速率模型……654
群落系数 CC……655
群落多样性和相似性指数……655
柏达木种群在单位面积内的光和产量 $P_总$模型……655
叶面积的测定与群落中光照分布模型……655
CO_2 增长响应模型……655
杰卡特指数的斯帕炭定量修正值……655
低分辨率生态系统模型……655
有机物质和氮的动态交互作用模型……656
间作农业生态系统的生态学方法……656
植物-有蹄类动物系统动态模型……657
集中结构的最优控制模型……657
生态系统的空间分布模型……657
生态位重叠计测的改进模型……658
树木生长方程……658
敏感指数 S_i……658
草原生态系统模型……658
Lotka-Volterra 模型……658
植被规模分布动态模型……659
生态系统主要组分的状态指数动态模型……659
一致性系数……659
能量品质因数 Q……660
中稻密植生态系统模型……660
门司公式与卜松分布模型……660
森林生态系统的灰色预测模型……660
群落结构的空间生态位模型……660
亚热带森林群落的生态优势度模型……660
系统灵敏度系数……661
逻辑斯谛方程……661
不同放牧强度下高寒草甸植被演替规律的数量分析模型……661
群体光合、暗呼吸和蒸腾作用的测定模型……661
Whittaker 相似性指数……662
群落-生境相关性指数……662
森林生态系统过程模型……662
环境梯度与植物群落指数模型……663
相似矩阵模型……663
生物量的生长率模型……663
枯枝落叶的分解、积累与营养物质含量动态模型……663
生态系统信息量 $I(x_1,\ldots,x_n)$……663
一维映射与 Monte Carlo 方法……664
物种-面积的平衡方程……664
植物群落的选择模型……664
生态系统人口承载力 CP 模型……664
鸟类群落组成及其多样性指数……664
Whittaker 相似性指数……664
羊草群落水分收支的特征模型……664
群落生产量的推算……665
杉木林系统氮素动态模型……665
分类单元之间的相似系数……665
养分循环模型……665
植物生物量的动态模型……666
n 个物种系统的生物量模型……666
种的生态位分析模型……666
农田生态系统的演变特点与机制……666
欧氏距离模型……667
植物群落的生态优势度模型……667
群落相似系数……667
任意时刻从土壤中进入植株硒数量模型……667
一年生植物群体的生长模型……667
综合草害指数及其频率模型……667
不同放牧强度下高寒灌丛群落特征模型……668
几种常见的多样性指数……668
气候变化对温带草原生态系统影响的仿真模型……668
生态系统的优势度……669
混农林业生态系统中的光照强度模型……669
农户生态系统中关键制约因子的定量分析……669
相对光强模型及生物量测定的数学模型……670
人工林分的生产力模型……670
自然系统的模拟及灵敏度分析模型……670
群落的多样性、稳定性和优势性模型……671
聚集强度模型……671
生物系统测度模型……671
群落结构分析公式……671
森林生态系统水循环模型……672
芒萁群落营养元素动态系统分析模型……673
时空生态位模型……673
生态系统稳定性分析模型……674
长芒草草原和苜蓿人工草地水分利用模型……674

生态系统组分的放射本能及优势度模型……674
稳定态生态系统模型……674
流动网络中区室 i 对于参数 p_j 变化阻力……675
生态位模型……675
广义 Logistic 模型……675
羊草群落优势度模型……675
受干扰北方阔叶林生态系统的早期连续过程模拟模型……675
在竞争下的群落动力学模型……676
样本平均值的精度模型……677
森林凋落物动态模型……677
垄埂接收的太阳辐射模型……677
样本间相似系数及群落特征模型……677
林窗的边缘效应强度 E……677
农田生态系统中的最优配置模型……677
改进的邻体干扰 I 模型……678
南部山区冬季鸟类群落生态模型……678
胶带内辐射平衡和热量平衡模型……678
油蒿的蒸腾作用及群落水分扩散模型……678
群落结构模型……678
种子散布模型……679
植物群落结构的空间模式指数(C)……679
群落结构对表型变化驱动下物种相互作用模拟模型……679
系统能流数学模型……679
生态场的空间分布动态模型……679
胁强系数 s……680
地上、地下生物量季节动态变化的 Logistic 方程……680
农林复合生态系统综合效益评价函数……680
群落蒸发速率 E……680
光合效率模型……680
生态能量效率测算模型……680
带有可能性和模糊参数的半干旱牧场生态系统仿真模型……681
森林系统模拟模型……681
生态系统动态信息挖掘模型……682
种群动态模型……682
Lambert-Beer 消光定律……682
棉田生态系统能流特征分析模型……682
防护林生态系统水量平衡方程……683
主要树木种群间联结关系模型……683
封闭系统中微生物种群生长的动态模型……683
种群构件结构及与环境因子的多元分析模型……683
生态系统信息综合模型……683
营养循环分析模型……684
蝗虫能流参数的计算——第二性生产力 P……684
三种寄生物与一种寄主的系统模型……684
群落的优势度模型……684
群落高度及结构分析模型……684
森林群落的种-多度关系模型……685
群落空间格局分析模型……685
误差平方和的求解及其来源的识别模型……686
森林生态系统的能量平衡方程……686
Chikugo 模型……686
杂草群落中杂草生态位模型……686
空间模式模型……686
落叶分解率及其氮损失的计算公式……687
结合指数……687
鸟类丰度及其指标共位群的预测方程……687
光合作用活性辐射(PAR)吸收值计算公式……687
植物丰度公式……688
水化学淋溶量 $L_1^{(1)}(t)$ 模型……688
热带山地雨林生态系统碳平衡模型……688
植物群落的结构特征及其分布格局模型……688
植物种群空间分布的点格局分析模型……689
木本和草本植物动态模拟模型……689
近岸海洋生态系统的浮游生物氮循环模型……689
森林生态系统净初级生产力模拟模型……690
水生生态系统模型(CASM 2.0)……690
随机迹地模型……691
群落初级生产力 y……691
农田中净辐射的计算……691
最佳载畜量与营养循环模型……692
物种丰度测量方法……692
旋转协方差测量模型……693
格氏栲林主要种群生态位模型……693
群落相似性指数模型……693
群落最小面积确定模型……694
林地有效水分来源途径分析模型……694
群落结构指数……694
孤立群落发展的可能性和确定性模型……694
栎林生态系统磷素动态模型……694
群落系数及其差异测量的欧几里得距离……695
农业生态系统的年度总熵变化方程……695
分层嵌套生态系统的热力学方程……695
能量收支方程……695
棉田生态系统的稳定性和多样性……695
生态系统服务功能评价模型……695
种-多度分布模型……696
群落的生物量和光能利用效率模型……696
鸟类群落指数(BCI)……697
Lloyd 拥挤性指数(L)……697
关联指数……697
蒸散力 E_0 的计算……697
马陆的生态效益及年分解量模型……697

蒸腾强度模型 …… 698
中肋骨条藻对磷吸收的计算方程 …… 698
"4P"概念、估算及其相互关系模型 …… 698
群落结构及其在落叶分解过程中变化的模型 …… 698
矮蒿草草甸植物群落生长分析的模拟模型 …… 698
各采样点潜水的主要理化指标 …… 699
^{60}Co 在水-土壤-水稻中的迁移模型 …… 699
鲻鱼寄生蠕虫群落中的种间关系 …… 699
群落结构分析模型 …… 699
生态模拟和扰动评估模型 …… 699
决定墨西哥洛斯德克斯拉斯地区森林、草地及玉米地的地上生物量组成的方程式 …… 700

第二十二章 行为生态学与进化生态学 …… 701

经典的 Rosenzweig-MacArtur 模型 …… 701
带有时间延迟的捕食者-被捕食者相互作用模型 …… 701
昆虫分布数量的时空模型 …… 701
森林中降水中途截留的预测模型 …… 701
种群动态模型 …… 702
生态位交叠系数 …… 702
岩石山地白杨生境中的草料生产模型 …… 702
粘虫迁飞的运动方程 …… 702
昆虫种群死亡过程的数字模拟模型 …… 702
粘虫的迁飞发生区及其分布的数学模型 …… 702
被捕食者-捕食者联合体的收获量模型 …… 703
Volterra 方程的极限环解 …… 703
捕食 II 模型 …… 703
捕食 I 模型 …… 704
Lotka-Volterra 的捕食-被捕食系统模型 …… 704
小鸟数量的结构模型 …… 704
土地等价系数概念模型 …… 704
帆布潜鸭的性别比率和最佳收获量模型 …… 705
资源消耗系统 …… 705
种群增长的数学模型 …… 705
捕食 III 模型 …… 706
滞留指数 I …… 706
两个共生水稻品种之间的邻近影响模型 …… 706
生境重叠模型 …… 707
两个竞争物种的生长模型 …… 707
草原生产者和消费者的多物种模拟模型 …… 707
t 时刻螺捕获数 y_t 回归模型 …… 708
Lotka Volterra 竞争方程 …… 708
资源有限捕食物种的标准方程和修正方程 …… 708
基于营养动态理论的捕食行为模型 …… 709
树木生长模型 …… 709
资源重叠指数 …… 711
单种捕食者-单种猎物系统模型 …… 712
以营养动力学为基础的捕食-食饵模型 …… 712
捕食者对第 i 种猎物的捕食比例 Q_i …… 712
捕食者的发育速率($1/d$) …… 712
样本成数与平均覆盖率 …… 712
捕食作用率模型 …… 712
食物消耗量及其利用模型 …… 713
步甲捕食的功能反应模型 …… 713
单种捕食者——两种猎物系统模型 …… 713
改进的 Holling 圆盘方程 …… 713
标准化的捕食比率 …… 714
冬小麦产量和杂草密度关系的多变性模型 …… 714
植物竞争模型 …… 714
Hilborn-Bazykin 方程 …… 714
食物网中的捕食行为模型 …… 714
功能响应模型 …… 715
基于碎屑的被捕食者-捕食者模型 …… 716
竞争量度、能力与激烈性模型 …… 716
两个拟寄生物的生物学控制模型 …… 716
空间自相关的 Moran I 统计量 …… 717
简单食物链模型 …… 717
替换率模型 …… 717
七星瓢虫对麦长管蚜捕食作用及其模拟模型 …… 717
二次回归旋转组合设计的数学模型 …… 718
食物的组成及食物的选择性模型 …… 718
牲畜种群对生态影响的分形估算模型 …… 718
一个捕食者-一个被捕食者系统收获的恒定产量模型 …… 718
种群生活习性的量度模型 …… 719
均质化 Hutchinson 方程 …… 719
狩猎影响的数学模型 …… 719
南部松树甲虫消失扩散模型 …… 719
动物的食谱宽度模型 …… 720
种群中的进化模型 …… 720
时间上离散的随机灭绝模型 …… 720
空间自相关分布型指数 …… 720
Lotka-Volterra 被捕食者-捕食者双物种系统模型 …… 721
野生和家养草食动物空间行为模型 …… 721
昆虫散布的 Weibull 分布 …… 721
外来植物传播模型 …… 722
野生动植物生境最优配置的连通性和空间相关性模型 …… 722
森林的死亡率函数 …… 722
Logistic 种群模型 …… 723
空间分布回归模型 …… 723
小生境适应性模型 …… 723
疟疾的时间空间动力学模型 …… 723
迁飞行为的参数化模式 …… 724
蚊幼对狼蛛的营养作用模型 …… 724

间作系统中不同种群的共生利益和相互作用模型 …… 724
野生种群的能量储存指数(E_{RI}) …… 725
物种丰度的折叠刀估算与本地物种灭绝概率 …… 725
叶片被采食率 Ig 模型 …… 726
鼠类与天敌的捕食-食饵模型 …… 726
浮游动物对浮游植物牧食力模型 …… 726
线虫无脊椎宿主系统模型 …… 726
植林地深度与鸟密度模型 …… 726
步行甲虫种群的补充模型 …… 727
个体散布指数 I …… 727
食物生态位宽度与重叠度模型 …… 727
交配系统的进化模型 …… 727
生态位分析模型 …… 727
生态足迹指标的计算与分析模型 …… 727

第二十三章　景观生态学 …… 729

阴暗针叶林空间格局模型 …… 729
侵蚀和沉积空间变化的随机区域模拟模型 …… 729
斑块特征指标模型 …… 729
景观生态空间格局动态度模型 …… 729
景观的空间模式差异与景观优势模型 …… 730
气候变化对森林景观短时影响的仿真模型 …… 730
农业景观生产潜力模型 …… 731
林网的景观指标及其布局的宏观度量模型 …… 731
离差指数 R …… 732
景观空间格局特征模型 …… 732
景观结构分析模型 …… 732
加权平均地块规模指数 (W_{MPS}) …… 732
每种植被类型的 Lacunarity 指数 …… 732
景观格局指数 …… 733
异质性的产生机制和景观异质性指数 …… 733
景观动态模型 …… 734
景观空间格局的测定模型 …… 734
有河岸缓冲区的景观中废水排放的启发式模型 …… 734
景观空间分析指标 …… 734
景观结构的影响模型 …… 734
景观格局指数 …… 735
缀块景观的种群动态模型 …… 735
模拟景观功能及其效应的网络法 …… 735
亨特山景观特征对沉积作用模型 …… 736
面积加权的覆被指数 …… 736
动态景观中的食草模型 …… 736
景观斑块密度和边缘密度模型 …… 736
景观特征指数 …… 737
农地景观格局变化指标体系 …… 737

第二十四章　全球变化 …… 738

年轮指数及其与气候因子的相关性模型 …… 738
空气传输部分的渐近线分析模型 …… 738
全球土地利用变化及规划模型 …… 738
估算生物圈结构中过量 CO_2 分布的模型 …… 739
两类取样环境的树木年轮生长量订正分析模型 …… 739
热带森林退化模拟模型 …… 739
北太平洋海面温度年变化的计算公式 …… 740
白蚁排泄甲烷的生态环境效应模型 …… 741
每年碳的净吸收计算公式 …… 741
模拟站点的气温资料延长方法 …… 741
全球生态研究的数学模型 …… 741
气候对地表变化的敏感性 …… 742
大气和陆地生态系统之间碳交换的动态模型 …… 742
解释气候变化的落叶林模型 …… 743
生态系统模型中增长增效器函数 …… 743
一个减少全球气候模型计算量的计算方法 …… 744
全球 N_2O 平衡模型 …… 744
气候和植被交互作用的极小值模型 …… 744
自然植被的净第一性生产力 NPP 模型 …… 745
基于分形方法的古温度推算公式和粒度分析 …… 745
生物量和光能利用效率的测定模型 …… 745
采用树木年轮资料重建山东沂山地区 200 多年来的湿润指数 …… 746
预测植物功能类型和生物痕迹气体流的全球植被动态模型 …… 746
Kira 指数 …… 746
人-地关系平衡模型 …… 746
离心力计算公式 …… 747
生物圈能量转移模型 …… 747
辐射强度增加时植物的相互作用模型 …… 748
陆地生态系统氮循环模型 …… 749
区域初级生产力与植物结构间相互关系的模拟模型 …… 750
陆地生态模型 …… 751
Lotka-Volterra 模型 …… 751
碳的渐进转换公式 …… 752
碳同位素影响的分析模型 …… 752
冰川粒雪中环境季节变化记录分析模型 …… 752
森林与草地的净第一生产力模型 …… 752
方解石的溶解与沉淀的计算公式 …… 752
冰川槽谷的横剖面梯级宽深比模型 …… 753
各对地块在分类学构成上的相异性 …… 753
净氮矿化参数分析模型 …… 753
全球大气信息模型 …… 753
热带地区萨瓦那草原-森林的滞后作用模型 …… 753
盐化草甸植被净初级生产力模型 …… 753
大气植被相互作用模式 …… 754

第二十五章 生物多样性……756

多样性指数 D……756
物种多样性计算公式……756
等级多样性指数 S……756
物种多样性指数……756
多样性指数……756
物种多样性指数 H'……756
群落多样性指数……757
物种丰富度的计算模型……757
生态系统多样性指数……757
种的多样性模型……757
群落多样性模型……757
生态的多样性度量模型……758
多样性指数与均匀度模型……758
森林退化和多样性的宏观最小化模型……758
物种丰富度动态模型……758
生态系统的结构多样性模型……759
常用中心式聚类最小码模式……759
浮游生物生产量及多样性模型……760
物种多样性的热力学模型……760
蝗虫种的多样性与均匀性指数……760
生物区室中的多样性……760
两个农场之间物种的相似性指数……760
扰动和多样性-密度效应模型……760
景观格局多样性模型……761
景观多样性指数……761
树种丰富度……761
多种群密度依赖增长模型……761
植物物种多样性指数……762
生物量多样性指数……762
珊瑚物种多样性指数……762
动物区系和微生物指数……762
生物多样性和相似指数……763
香农多样性指数的最小值和最大值……763
克隆多样性指数 D……763
多样性量度公式……763
分类学差异指数……763
生态系统中营养结构和过程的多样性模型……764
山地草甸 β 多样性……764
群落模型……765
群落多样性测度指标计算……765
植物群落物种数目的估计模型……765
物种多样性测度方法……766
趋势面分析模型……766
多样性指数和平坦指数……766
群落的多样性模型……766
种-面积曲线的拟合与评价模型……767
栖息地多样性……767
辛普森植物多样性指数……767
生境多样性(D_h)……767
二次熵多样性指数 Q……768
基于过程的种属植物模型……768
多样性指数的选择与测定……769
物种-面积的相关模型……769
杉木林群落多样性模型……769
遗传相似度模型……770
多样性分析指数……770
森林物种多样性指数……770
景观多样性分析模型……770
生物多样性评价模型……771
群落多样性变化分析模型……771
基于多维分数维的生态多样性模型……771

第二十六章 毒理生态学……772

害虫物种数量的回归方程……772
不饱和多孔渗水介质中化学物质转移的数学模型……772
土壤中杀虫剂动态仿真模型……772
种群中有毒物质总量动态模型……773
不依赖于年龄的害虫模型……773
临界效果模型……774
序贯抽样模型……774
二代残虫造成的皮棉经济损失 L_2 模型……774
天敌攻击率 E 模型……774
种群与有毒物质的相互作用模型……774
莱斯利矩阵模型……775
化学药品在空气、土壤和水的界面间动态均衡分布的微分方程……775
抗虫性指标 K……776
细菌活泼发育区半径 r……776
两种天敌与一种害虫相互作用模型……776
土壤中杀虫剂降解的动态模型……776
Guderian 函数模型……777
森林死亡率 (M)……777
六六六在农业生态环境中的行为模型……777
口蹄疫-野生猪模型……777
杀虫剂在不饱和地区的转移和降解模拟方程……777
温度对使用杀虫剂控制 oryzae 影响的模拟模型……778
木薯植物的碳、氮和水分动态模拟……778
褐稻虱再猖獗原因的分析模型……778
杀虫剂效能模拟模型……778
基本的疟疾模型……779
污染预测模型……779
棉花叶面积损失模型……779
条锈病流行的定量分析模型……779

温度对杀虫剂降解率影响的动态模型……779
舞毒蛾种群动态模型……780
累计相对病死频率 $F(x)$……780
杀虫剂参数估算模型……780
森林有害物扩散模拟模型……780
植物病扩散模型……781
寄主-拟寄生物模型……781
杀虫剂对 lumbricid 种群的影响评价模型……781
野生生物疾病控制模型……782
农药污染对土壤动物呼吸代谢的影响模型……782
病原菌感染的种群模型……782
再植和康复的流行病学模型……782
矿化作用动态模型……783
媒体传布的菌病种群模型……783
害虫种群复活的模拟模型……783
小麦条锈病发生规律预测模型……783
扁虱种群动态模型……784
预测核事故后果的动态食物链模式与程序……784
多金属潜在风险指数 I_r……786
杆状病毒传染及其造成的经济损失模型……787
控制野猫的数学模型……787
受侵害白云杉的存活时间分析模型……787
捕食功能减退率 D_f……788

第二十七章 生态管理与恢复生态学……789

可更新资源管理的矩阵方法……789
最优放牧模型……789
起始过程的发芽期模型……790
森林管理模型……790
最佳策略的存在模型……790
开发指数(I_d)的计算公式……790
植物物种组成和覆盖度动态模型……790
降雨不确定条件下碱性土改造的数学模型……791
预测 SO_2 和火灾对西部松树森林的影响模型……791
高寒草甸灭鼠后鼠兔和鼢鼠数量恢复的数学模型……792
生物生产量模型……792
人参生态气候适应性分区指数 $\bar{\mu}$……792
半沙漠山地的最优苗木密度-灾害模型……792
贴近度模型……793
叶绿素含量模型……793
William-Clifford 相异性指标……793
自然保护理论模型……793
森林砍伐后植物再生长的马尔可夫模型……793
一块喀斯特草原样本的灭绝时间模型……794
单株植物水分营养面积与蒸发量模型……794
常绿阔叶林分类的相似性系数 r_{ij}……794
种间相遇几率 P_{IE}……794
土壤储水量 ΔM……794
种群密度 D 和休耕期 P 的关系……794
一致性检验模型……794
气候及气候生态因子相关分析……795
森林资源退化和再生的数学模型……795
固沙林引起下垫面热量平衡特征变化的分析模型……795
相似系数(隶属度)r_{ij}……796
邻体竞争效应及邻体干扰指数……796
相异性分析和模糊判别模型……796
森林动态模型……796
经济生态发展模式……797
湿地松人工林生物量模型……797
草场中羊草枯枝落叶形成过程模型……797
光强度 I……797
渔业生态经济系统动态模型……797
草场质量指数 I_{gq}……798
油松人工林生物量和生产力模型……798
旱地作物生态工程的设计模型……798
樟子松固沙林动力效应模型……798
FORSKA 模型……798
海藻生长和最优采集模型……799
森林资源采伐效益的综合评价模型……799
马尾松生长及虫害损失模拟模型……800
植物生产量预测模型……800
生态农业综合效益评价模型……801
物种数量-丰富度关系的对数正态分布……801
生态区数量分类模型……801
游隼的适度种群模型……801
乱流扩散模型……802
森林草原放牧模型……802
复杂森林景观中物种守恒的生态经济模型……802
投入产出模型……802
森林经营方案的反馈控制模型……803
香农(Shannon)平坦指数……804
投影格网的代表值 (V_{np})计算公式……804
枯枝落叶积累量(L)……805
群落多样性指数及易侵蚀系数……805
林业经营综合效益指标……805
践踏强度和植被反应关系模型……805
弹性指数的计算公式……805
植被及植物群落退化指数的计算……805
资源动力学模型……806
野草湿地的退化模型……806
杂草群落模型……806
栖息地镶嵌模型……807
华北落叶松生态适应性评价模型……807
样本单位虫口数阈的重要性模型……807

环境潜在指数 E …… 807
土壤水分动态方程 …… 807
红三叶-黑麦草人工草地刈割演替分析模型 …… 808
森林合理年伐量综合评价模型 …… 808
炼山后杉木人工林地养分流失定量分析模型 …… 808
降水终速度的求取及林地所接收的总动能模型 …… 808
流域生态经济区划方法 …… 809
山区生态环境质量评价指标体系 …… 809
群落演替的数学模型 …… 809
加权植被反应率 …… 809
人工神经网络模型 …… 810
样本平均方差的无偏估计 …… 810
依赖于密度的增长率 $R(t)$ …… 810
成本效益分析模型 …… 810
黄土高原小流域治理系统评估模型 …… 810
森林生物量的估算模型 …… 811
郁闭森林覆盖度的变化分析模型 …… 811
森林监测方法 …… 812
美国淡水生态系统服务的经济价值评估方法 …… 812
种子萌发率(G_p)和萌发速率(G_σ) …… 812
Sigmoid 函数 …… 812
生态系统的优先恢复指数 I_{pr} …… 813
森林结构变化的相似性百分比(P_s) …… 813
绿洲生态需水模型 …… 813
在约束条件下造林规划设计的数学模型 …… 813
食物生产与土地人口容量的系统分析模型 …… 813
边缘效应强度模型 …… 814
生态经济评价指数 …… 814
林分密度 N 与平均直径 D 的关系模型 …… 814
树的规划点模式 …… 814
森林倒木的形成及其储量动态模型 …… 814
对虾生产量测定模型 …… 815
衡量可持续发展的新指标 …… 815
林土壤改良效益评价模型 …… 815
景观动态模型 …… 816
生态系统服务价值模型 …… 816
土层抗张强度的增量 $\Delta\tau_T$ …… 816
具有天敌捕食的鼠害综合防治模型 …… 817
预警评价指标体系 …… 817
火灾频率对林分结构与动态过程影响模型 …… 818
生态脆弱性指数 EFI …… 818
湿地区域生态风险评价模型 …… 818
流域水质管理系统模型 …… 818
植被净第一性生产力 WBINPP 模型 …… 819
生态系统生产力等级分值的计算公式 …… 819
碱化草地群落恢复演替空间格局动态分析模型 …… 819

第二十八章 其他生态环境模型 …… 820
立地碳预算模型 …… 820
估算野生植被对路边环境变更的感受模型 …… 820
物种-区域关系的变化分析方程 …… 820
环境评价模型 …… 820
Levins 回路分析法及其扩展模型 …… 821
估算最大可再生资源的方法 …… 821
吸收差异模型 …… 821
森林对氢氟化物的吸收模型 …… 821
种子散布距离 …… 822
河流污染的相似系数 r_{ij} …… 822
土壤中残留农药 R 模型 …… 822
过滤过程数学模型 …… 822
越野火灾蔓延机制模拟模型 …… 822
非点污染源排放单位物质响应函数 …… 822
物种替代模拟模型 …… 823
传热系数 …… 823
斜面太阳辐射强度 I …… 823
综合决策模型 …… 823
荆条灌丛分类的模糊聚类模型 …… 823
街道绿化减噪模型 …… 824
杉木人工林辐射状况分析模型 …… 824
物质循环和生长分析模型 …… 824
冲积平原的输入负载模型 …… 824
森林冠层辐射的数值模拟模型 …… 824
植物热值模型 …… 825
采矿和侵蚀对生物量生产的影响的模拟模型 …… 825
大范围森林的区域碳储量模拟模型 …… 826
污染物地表浓度的高斯烟柱模型 …… 826
迈阿密模型 …… 826
生物与其环境的热交换模型 …… 826
种群分布界线的隶属度函数 …… 827
生物热环境的综合表示法 …… 827
浮游植物初级产量的测定模型 …… 827
土壤微生物能量流动的稳定性分析模型 …… 827
农田蒸腾估算模型及其边界层阻力模型 …… 827
反射率气候模拟模型 …… 828
针毛草原放牧衰退演替阶段的模糊据类分析模型 …… 828
生态环境脆弱带的判定模型 …… 828
土壤微生物呼吸速率的季节变化与土壤温度、土壤水分的关系模型 …… 829
直射光通量 $S_{\alpha\beta}$ …… 829
聚集分析模型 …… 829
Morisita 指数 I_δ …… 829
局部派生方程的双生系统模型 …… 829
汾河水库输沙量的灰色关联分析模型 …… 830
峨眉山金顶冷杉死亡与化藏寺火灾关系模型 …… 830
阔叶树叶面积的通用测算模型 …… 830

人口密度与生物资源的关系模型 830
产量与密度之间的关系模型 831
共生生物的环境保护模型 831
群体潜在蒸腾量 T_p 831
SPAC 水热动态模拟模型 831
油松毛虫优化管理决策模型 832
枯枝落叶与分解者之间能量流动模型 832
净第一性生产力 P_n 832
泥炭样本中的气体流通率 832
侧柏、油松混交林混交效益模型 832
柑橘产量结构生态环境模式 832
海洋浮游植物量模型 833
^{14}C 法测定的底栖植物光合作用速率 P 833
BACI 取样方案的两种分析模型 833
相对电导率 833
水稻-二化螟系统模型 833
水流阻力模型 833
主要生态因子对分解的效应模型 834
热度 (r_{ah})和蒸汽 (r_{av})的空气动力学阻力模型 834
植物-土壤的均衡行为模型 834
净生产量模型 835
杨树护田林带疏透度模型 835
树木基本面积预报模型 835
臭氧对春小麦生长影响的分析模型 835
营养生态位模型 836
n 维生态位宽度 H_B 模型 836
叶片面积指数 I_{la} 836
有蹄类动物草料计算模型 836
城市绿化树木的降温增湿效应模型 837
适宜绿洲面积计算模型 837
浮游生物生物量指数 837
污染物质量平衡方程 837
作物田间耗水量模型 838
Logistic 曲线方程 838
生态位适宜度模型 838
生态势及场梯度模型 838
生态环境脆弱性指标 F 的两种计算方法 838
综合污染指数 I_{ip} 839
冠层水分利用效率 E_{wu} 839
生态环境的差异性分析模型 839
杉木林生物生产力格局的数学模型 839
土壤呼吸速率 V 839
农田蒸散 E_a 839
冬小麦冠层对光合潜能影响的分析模型 840
农田杂草生态位模型 840
半方差模型 840
红壤丘陵小流域生物生产能力分析模型 840
CENTURY 模型 841
野火扩散的运算法则 841
根冠关系模型 841
生态环境评价模型 841
气候变化所引起的河流排水量模型 842
孢粉总数与孢粉浓度模型 842
有机质的重量损失模型 842
CO_2 浓度增长对杉木针叶光合特性的影响模型 842
着火时间分布 $A(t)$ 842
农村可持续发展评估模型 842
土地资源环境状况评价指标 843
环境质量系统分析模型 843
转化产物二次作用空间范围的测度模型 843
主要生态环境质量现状评价模型 843
储草面积模型 843
生态环境综合评价指数 844
河流系统生态环境需水量概算模型 844
差异指数 $VI(2^k)$ 844
物种对于给定群丛的特异性和确限度模型 844
森林地块中物种成分差异性模型 844
综合污染指数 I 845
有机氮的净矿化与硝化量模型 845
矿化作用与硝化作用方程 845
稳态光响应特性模型 845
森林群体遗传动态的遗传标记监测模型 845
UV-B 辐射对香蕉的影响模型 845
人工神经网络与遗传算法 846
SCS 模型的降雨-径流关系模型 846
风成沙丘固定程度综合指数 846
植被覆盖率及其对土壤性状的影响模型 846

附录 几个重要的综合模型

附录 A 全球环境综合评估模型(IMAGE) 851
1. 模型概述 851
2. 人口-健康综合模型(PHOENIX) 851
3. 世界经济模型(WorldScan) 852
4. 陆地植被模型(TVM) 853
5. 农业经济模型(AEM) 853
6. 土地覆盖模型(LCM) 853
7. 土地利用排放模型(LUEM) 854
8. 全球环境综合评估模型目标的能量区域性模型(TIMER) 855
9. 能量与产业排放模型(TEM) 855
10. 陆地碳模型(TCM) 857
11. 海洋碳模型(OCM) 857

12. 大气化学模型(ACM)……857
13. 上涌-扩散气候模型(UDCM)……857
14. 地理模式-尺度模型(GPS)……858
15. 土地退化模型(LDM)……858
16. 海平面上升模型(SLRM)……859
主要参考文献……859

附录 B　全球性水资源评估与诊断模型(WaterGAP)……860
1. 模型背景概述……860
2. 模型组成及其功能……860
主要参考文献……862

附录 C　农产品及贸易政策分析国际模型(IMPACT)……863
1. 模型概述……863
2. IMPACT 模型基本的研究方法……863
3. IMPACT 模型的技术方法……864
主要参考文献……867

附录 D　Ecopath with Ecosim 系统模型……868
1. 模型概述……868
2. Ecopath 模型……868
3. Ecosim 模型……869
4. Ecospace 模型……872
主要参考文献……872

附录 E　多区域性资源与产业配置的综合研究模型(MARIA)……873
1. 模型概述……873
2. 全球变暖子系统……874
3. 经济活动子系统……874
4. 能量流子系统……874
5. 食物与土地利用子系统……874
主要参考文献……874

附录 F　气候与经济的动态综合模型(DICE)……876
1. 模型概述……876
2. 模型组成与结构……876
3. 模型输入输出及公式表达……877
主要参考文献……878

附录 G　亚太综合模型(AIM)……879
1. 模型概述……879
2. 模型组成及其系统结构……879
3. 模型特征……882
主要参考文献……883

附录 H　GHG 排放减少政策对区域及全球性影响的评估模型(MERGE)……884
1. 模型概述……884
2. 模型的组成机理……884
3. MERGE 模型内生技术的单因子学习曲线函数……885
4. MERGE 模型内生技术的双因子学习曲线函数……885
主要参考文献……886

附录 I　全球大气环流综合评估模型(GCM)……887
1. 模型概述……887
2. 模型的动态系统结构……887
3. GCM 模型初始条件……888
4. 模型参数与边界条件……888
主要参考文献……888

附录 J　IIASA 人口模型……889
1. 模型概述……889
2. IIASA 人口模型的研究目标与研究主题……889
3. PDE 模型的系统组成结构……890
4. PDE 模型的研究方法……890
5. PDE 模型的优势及缺陷……891
主要参考文献……891

附录 K　袖珍型气候评估模型(MiniCAM)……892
1. 模型概述……892
2. 模型应用的研究区域……892
3. 模型研究的宏观经济活动层次……892
4. 模型研究的能量部门……892
5. 模型研究的农业部门……892
6. 模型研究的气体排放……893
7. 模型研究的气候变化及其影响……893
8. MiniCAM 模型的组成及系统结构……893
主要参考文献……894

附录 L　城市环境容量集成模型……895
1. 模型的集成背景……895
2. 集成模型的系统结构……896
3. 模型运行分析……898
主要参考文献……898

第 一 篇

地球信息科学

第一章 遥感成像与信息传输机制

植被冠层的热辐射数值方程

Kimes D S：植被冠层结构对遥感冠层温度的影响．Remote Sensing of Environment，1980，10

$$L(\theta,\phi)=\pi^{-1}\sum_{i=1}^{n}\left[\left(\prod_{k=0}^{i-1}P_{\mathrm{gap}k}(\theta,\phi)\right)P_{\mathrm{hit}i}(\theta,\phi)\varepsilon_i\sigma T_i^4\right]$$

式中，$L(\theta,\phi)$ 是表示为视角(θ,ϕ)的函数的冠层热红外辐射，这里θ和ϕ分别是倾斜角和方位角；n 是包括地面在内的冠层系统的离散层的数目；$P_{\mathrm{gap}k}(\theta,\phi)$是第 k 层在方向(θ,ϕ)上的间隙概率，且对所有θ和ϕ，$P_{\mathrm{gap}0}(\theta,\phi)$=1.0；$P_{\mathrm{hit}i}(\theta,\phi)$是第$i$层在方向$(\theta,\phi)$上辐射被截住的概率，对 $i=k$，有 $P_{\mathrm{gap}k}(\theta,\phi)=1-P_{\mathrm{hit}i}(\theta,\phi)$，对所有$\theta$和$\phi$，$P_{\mathrm{hit}n}(\theta,\phi)$=1.0，这里$n$表示地面；$\varepsilon_i$是在第$i$层各种成分的平均发射率；$T_i$是第$i(K)$层各种成分的平均表面温度；$\sigma$ 是 Stefan-Boltzmann 常数。

当冠层被抽象为一个简单的两层系统(植被与土壤)时，则只考虑传感器的视底角方向，简化方程给为：

$$\hat{T}_S^4=P_{\mathrm{gap}}T_G^4-(1-P_{\mathrm{gap}})T_C^4$$

式中，$\hat{T}_S$是从底角方向观察的传感器的理论有效辐射温度；T_G是地面的平均有效辐射温度；T_C是冠层叶片的平均有效辐射温度；P_{gap}是在底角方向上穿过冠层的间隙概率。

观测角度对植物冠层温度的辐射测量影响的计算模型

Kimes D S，Idso S B，Pinter P J et al：观测角度对植物冠层温度的辐射测量的影响．Remote Sensing of Environment，1980，10

对 1，2 和 3 层植物冠层系统，模型分别给出下列方程：

$$T_{S,1}(\theta)-[P_{\mathrm{hit1}}(\theta)T_1^4+P_{\mathrm{gap1}}(\theta)T_1^4]^{1/4}$$

$$T_{S,2}(\theta)-[P_{\mathrm{hit1}}(\theta)T_1^4+P_{\mathrm{gap1}}(\theta)P_{\mathrm{hit2}}(\theta)T_2^4+P_{\mathrm{gap1}}(\theta)P_{\mathrm{gap2}}(\theta)T_G^4]^{1/4}$$

$$T_{S,3}(\theta)=[P_{\mathrm{hit1}}(\theta)T_1^4+P_{\mathrm{gap1}}(\theta)P_{\mathrm{hit2}}(\theta)T_2^4+P_{\mathrm{gap1}}(\theta)P_{\mathrm{gap2}}(\theta)P_{\mathrm{hit3}}(\theta)T_3^4+P_{\mathrm{gap1}}(\theta)P_{\mathrm{gap2}}(\theta)P_{\mathrm{gap3}}(\theta)T_G^4]^{1/4}$$

式中，$T_{S,i}(\theta)$是通过一个在顶角为θ 的方向上进行观测的传感器测量到的 i 层冠层系统的有效辐射温度；T_i 是冠层中第i层的成分的平均有效辐射温度；T_G是地面的平均有效辐射温度；$P_{\mathrm{gap}i}(\theta)$是当从角度$\theta$观察时冠层中第 i 层的间隙概率；$P_{\mathrm{hit}i}(\theta)$是植物被光线照上的概率；$P_{\mathrm{hit}i}(\theta)$=1－$P_{\mathrm{gap}i}(\theta)$。

林冠中光的透射和反射分析公式

崔启武，朱劲伟：林冠的结构和光的分布——光的透射和反射理论．地理学报，1981，36(2)

(1) 林冠下的直射透过光强：

$$I_c=I_0\exp[-(a+b)\csc h_\Theta\cdot F_m(\sin\alpha\cos\beta\cdot\cos h_\Theta+\cos\alpha\sin h_\Theta)]$$

式中，I_c为林冠下的直射透过光强；F_m为叶面积系数；h_Θ为太阳高度；α 为叶面的仰角；β 为方位角；以 a，b，c 分别表示树叶对光的反射系数、吸收系数和透射系数，且$a+b+c=1$。

(2) 随机分布叶层林冠下的直射透过光强：

$$I_c=I_0\exp\left[-(a+b)\frac{2}{\pi}F_m\cdot\csc h_\Theta\right]$$

式中，I_c为随机分布叶层林冠下的直射透过光强；其他变量同上。

(3) 单向的大气散射辐射透过量为：

对特殊交角叶层：

$$I_c'=I_0'\exp[-(a+b)\sec\theta\cdot F_m(\sin\alpha\cos\beta\cdot\sin\theta+\cos\alpha\cos\theta)]$$

式中，I_0'为来自天空某一方向的、到达林冠上的大气散射辐射强度；θ 为单向的大气散射辐射的天顶角；其他变量同上。

对于随机分布叶：

$$I_c'=I_0\exp\left[-(a+b)\frac{2}{\pi}\cdot F_m\sec\theta\right]$$

(4) 直射光的漫反射分析公式：

整层林冠的向上漫反射光可表达为：

$$I_{a上}=\frac{a(1-a^{2n})}{1-a^2}\cdot\frac{I_0}{2(a+b)}\{1-\exp[-2(a+b)F_m]\}$$

下方漫射率为：

$$f(F_m)=\frac{a^2(1-a^{2n})}{1-a^2}F_m\exp[-(a+b)F_m]$$

(5) 散射光的漫反射分析公式：

水平叶层结构中大气散射光的漫反射透过量可表达为：

$$S'_{a上}=\frac{a(1-a^{2n})}{1-a}\cdot\frac{S'_0}{2(a+b)}\{1-\exp[-2(a+b)F_m]\}$$

$$S'_{a下}=\frac{a^2(1-a^{2n})}{1-a^2}S'_0F_m\exp[-(a+b)F_m]$$

叶片垂立、方位角朝向太阳的叶层结构中大气散射光的漫反射透过量可表达为：

$$S'_a=$$
$$2\pi\frac{a(1-a^n)}{1-a}F_mI'_0\cdot\int_0^{\frac{\pi}{2}}\sin^2\theta\exp[1-(a+b)F_m\tan\theta]d\theta$$

微波雷达对玉米和高粱的冠层水分、叶面积指数和干重的响应模型

Brakke T W, Kanemasu E T, Steiner J L et al: 微波雷达对玉米和高粱的冠层水分、叶面积指数和干重的响应. Remote Sensing of Environment, 1981, 11

(1) 散射截面积(σ^0)与雷达天线接收到的功率(P_r)的关系为：

$$P_r=\frac{P_tG_tG_r\lambda^2A\sigma^0}{(4\pi)^3R_t^4}$$

式中，P_t是发射功率；G_t是发射天线的增益；G_r是接收天线的增益；λ是波长；R_t是目标距离；A是目标面积。

(2) Ulaby 和 Bush 定义了一个归一化水分含量 $w\,(g\cdot m^{-1})$：

$$w=\frac{m_w-m_d}{h}$$

其中 m_w和 m_d分别是玉米的湿重和干重，h是植物高度。与雷达在 17 GHz, 50°, VV(垂直发射，垂直接收)极化方向上的散射系数σ^0的最佳拟合关系为：

$$\sigma^0=-28.778+8.762\ \lg w$$

基于卫星微波辐射计的降雨率探测模型

Burke H K, Hardy K R, Tripp N K: 利用卫星微波辐射计探测降雨率, Remote Sensing of Environment, 1982, 12

(1) 半径为r的雨滴数密度$N(r)$可用 Deirmendjian 分布来描述：

$$N(r)=Ar^{C_1}\exp(-Br^{C_2})$$

式中，C_1和C_2是形状参数，C_1影响小半径雨滴的分布，而C_2影响大半径雨滴的分布；A和B是尺度参数，

$$A=\frac{MC_2B^C}{4/3\pi10^6\Gamma^C}$$

$$B=\frac{C_1r_0^{-C_2}}{C_2}$$

这里 $C=(C_1+4)/C_2$，Γ是伽马函数，M是液态水密度，r_0是模半径。

(2) Marshall-Palmer 分布：

$$N(r,R)=K_1\exp(-K_2rR^{-K_3})$$

这是 Deirmendjian 分布的一个特例，即 $A=K_1$，$B=K_2R^{-K_3}$，C_1=0，C_2=1，R是降雨率。

(3) Laws 和 Parsons (1943)得到的经验观察谱：

$$M=0.0636(R^{0.881})$$

$$r_0=225+9.16(R^{0.881})$$

$$(r_0)_{max}=375$$

$$C_1=4.0$$

$$C_2=0.70-0.00458(R^{0.881})$$

$$(C_2)_{max}=0.625$$

式中，M的单位为 $g\cdot cm^{-3}$；R的单位为 $mm\cdot h^{-1}$；r，r_0的单位为 m。

消除地形影响的方法

傅抱璞，潘裕强，王月蓬等：秦岭太白山的辐射状况. 地理研究，1983，2(3)

$$D=\frac{D_a-A_R}{1-A}$$

$$A = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}[\sin\alpha\cos h(\varphi) + \frac{1}{2}\sin 2h(\varphi) +$$

$$\cos\alpha\sin^2 h(\varphi)]\mathrm{d}h$$

式中，D 为没有地形遮蔽时的散射辐射；D_a 为在有地形遮蔽下用天空辐射表所实际测得的散射辐射。

辐射随海拔高度的变化模型

傅抱璞，潘裕强，王月莲等：秦岭太白山的辐射状况．地理研究，1983，2(3)

(1) 辐射量与海拔高度的关系：

$$S_z = S_0 - (S_0 - S_h)\ \mathrm{e}^{-0.000\,194(z-h)}$$

$$D_z = D_h \mathrm{e}^{-0.000\,226(z-h)}$$

$$Q_z = Q_0 - (Q_0 - Q_h)\ \mathrm{e}^{-0.000\,177(z-h)}$$

式中，S_0 为大气外界的直接辐射；Q_0 为大气外界的总辐射；S_h、D_h，Q_h 及 S_z，D_z，Q_z 为某一固定高度 h 和任意高度 z 处的直接辐射、散射辐射和总辐射。

(2) 有效辐射的计算公式：

$$E_z = E_h + 1.96\times10^{-6}\left[(5000-z)z-(500-h)h\right]$$

式中，E_h 和 E_z 分别代表在某一固定高度 h 和任意高度 z 处的有效辐射。

(3) 辐射量与气压的关系：

$$S_z = S_0 - (S_0 - S_h)\left(\frac{P_z}{P_h}\right)^{1.664}$$

$$D_z = D_h\left(\frac{P_z}{P_h}\right)^{1.936}$$

$$Q_z = Q_0 - (Q_0 - Q_h)\left(\frac{P_z}{P_h}\right)^{1.516}$$

反射率计算公式

傅抱璞，潘裕强，王月莲等：秦岭太白山的辐射状况．地理研究，1983，2(3)

(1) 反射率的计算公式：

$$\overline{A} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} R(t)\,\mathrm{d}t}{\int_{t_1}^{t_2} Q(t)\,\mathrm{d}t} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} A(t)Q(t)\,\mathrm{d}t}{\int_{t_1}^{t_2} Q(t)\,\mathrm{d}t}$$

式中，$\overline{A}$ 为日均反射率；R 为反辐日总量；Q 为总辐射日总量；t_1、t_2 为日出和日落的时间。

(2) 晴天反辐射率的计算公式：

$$\overline{A} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} A(t)\sin h\mathrm{d}t}{\int_{t_1}^{t_2}\sin h\mathrm{d}t} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i \sin hi\cdot\Delta t_i}{\sum_{i=1}^{n}\sin hi\cdot\Delta t_i}$$

微波亮度温度数据的大气校正模型

Rao K S, Murthy Y V S, Gopalan A K S et al：微波亮度温度数据的大气校正模型．Remote Sensing of Environment，1983，13

(1) Schanda (1979)给出的辐射传输方程的近似解为：

$$T_{\mathrm{B}} = T'_{\mathrm{B}} t_{\mathrm{a}} + T_{\mathrm{Ba}}^{(\mathrm{u})} + T_{\mathrm{Ba}}^{(\mathrm{d})} R_{\mathrm{e}} t_{\mathrm{a}}$$

式中，T_{B} 是 SAMIR 记录的亮度温度；T'_{B} 是地面对象的亮度温度；t_{a} 是包含云、水蒸气和氧气的大气的透射率；$T_{\mathrm{Ba}}^{(\mathrm{u})}$ 是大气上行辐射；$T_{\mathrm{Ba}}^{(\mathrm{d})}$ 是大气下行辐射；R_{e} 是地面对象的反射系数。

(2) 把大气层分为许多层，假设每层有一个平均温度，表示这一层的平均辐射温度，则 $T_{\mathrm{Ba}}^{(\mathrm{u})}$，$T_{\mathrm{Ba}}^{(\mathrm{d})}$ 及 t_{a} 的表达式为：

$$T_{\mathrm{Ba}}^{(\mathrm{u})} = (1-t_1)\overline{T}_1 t_2 t_3\cdots t_n + (1-t_2)\overline{T}_2 t_3 t_4\cdots t_n + (1-t_n)\overline{T}_n$$

$$T_{\mathrm{Ba}}^{(\mathrm{d})} = (1-t_1)\overline{T}_1 + (1-t_2)\overline{T}_2 t_1 + (1-t_n)\overline{T}_n t_1 t_2\cdots t_{n-1}$$

$$t_{\mathrm{a}} = \prod_{i=1}^{n} t_i$$

式中，n 是大气层分为的层数；t_i 是第 i 层的透射率；$\overline{T}_i$ 是第 i 层的平均温度。

(3) 水蒸气的衰减：

$$\alpha_{\mathrm{w}} = 3.24\times10^{-4}\mathrm{e}^{-644/T}\left[\frac{\upsilon^2 p\rho}{T^{3.125}}\left(1+0.0147\frac{\rho T}{P}\right)\right]\times$$

$$\left[\frac{1}{(\upsilon-22.235)^2+\Delta\upsilon^2}+\frac{1}{(\upsilon+22.235)^2+\Delta\upsilon^2}\right]+$$

$$\left(2.55\times10^{-8}\frac{\rho\upsilon^2\Delta\upsilon}{T^{3/2}}\right)$$

式中，$\Delta\upsilon$ 是谱线宽度；υ 是频率；P 是压强；T 是绝对温度；ρ 是水蒸气密度。

利用卫星热红外数据估计表面温度的计算模型

Price J C：从卫星热红外数据估计表面温度——大气效应的简单

公式. Remote Sensing of Environment, 1983, 13

卫星亮度温度(T_{BB})根据辐射测量值可定义为：

$$T_{BB}=B^{-1}(I_s)$$

式中，B^{-1}是 Plank 函数的反函数；I_s是卫星观测到的辐射值。

地面亮度温度 T_g 可表达为：

$$T_g=\alpha T_{BB}+\beta$$

式中，$\alpha=\left.\frac{\partial T_g}{\partial T_{BB}}\right|_{T_0}$，这里 T_0 是地表气温；$\beta=T_1-\alpha T_{BB1}$，T_{BB1} 为 T_1 时的卫星亮度温度。

雪累积率的计算方法

徐希孺：微波遥感测定南极洲雪累积率. 地理学报, 1984, 39(2)

$$D^2(Z)=D^2(0)+Kt$$

式中，t 为深度 Z 处雪颗粒的年龄；$K=K'A$ 为雪颗粒尺度时间增长率，A 为多年平均雪累积率，K' 为雪颗粒尺度深度增长率；$D^2(Z)$ 为 Z 处的雪颗粒横截面积；$D^2(0)$ 为 Z=0 处的雪颗粒横截面积。

地面长波辐射经验计算公式

周允华：青藏高原地面长波辐射经验计算方法. 地理学报, 1984, 39(2)

(1) 水汽和 CO_2 的混合发射率和水汽有效光学厚度的关系：

$$\varepsilon(W^*,u^*,T)=\varepsilon(W^*,T)+\varepsilon(u^*,T)-\Delta\varepsilon(W^*,u^*,T)$$

式中，$\varepsilon(W^*,u^*,T)$ 为水汽和 CO_2 的混合发射率；$\varepsilon(W^*,T)$ 和 $\varepsilon(u^*,T)$ 分别为水汽和 CO_2 的发射率；$\Delta\varepsilon(W^*,u^*,T)$ 为水汽和 CO_2 光谱重叠区的订正项。

(2) 水汽有效光学厚度和可降水量的关系：

$$\frac{W^*}{W}=\frac{\int_0^P \frac{P'}{P_0}q\mathrm{d}P'}{\int_0^P q\mathrm{d}P'}$$

式中，P' 为气压变量；P_0 为标准大气压；q 为比湿；P 为测点气压；W^* 为水汽有效光学厚度。

(3) 青藏高原地面绝对湿度和大气可降水量与水汽有效光学厚度的关系：

$$\lg W^*=-0.908+\lg\left(0.062+0.718\frac{P}{P_0}\right)+1.128\ \lg e$$

式中，e 为地面绝对湿度；P 为地面气压。

(4) 青藏高原水汽和 CO_2 大气层的混合发射率 $\varepsilon(H_2O+CO_2)$ 和地面绝对湿度的关系：

$$\varepsilon(H_2O+CO_2)=0.595+0.289\lg\frac{P}{P_0}+0.155\lg e$$

(5) 高原晴天条件下实际大气的视发射率：

$$\varepsilon_0=\frac{G_0}{\sigma T_a^4}$$

式中，ε_0 为晴天条件下实际大气的视发射率；G_0 为晴天地面大气逆辐射；σT_a^4 为百叶箱温度。

(6) 实际天空的大气逆辐射：

$$G=G_0(1+kn)=\varepsilon_0\sigma T_a^4(1+kn)$$

式中，G 天空有云时的大气逆辐射；G_0 为晴朗天空的逆辐射；n 为总云量(以小数表示)；k 与云底温度和云底与地面之间大气的水汽含量有关。

(7) 地面有效辐射的经验计算公式：

$$F=F_0(1-k'n^{\alpha})$$

式中，F 为有效辐射；F_0 为晴天有效辐射；n 为总云量，k' 和 α 为经验系数。

大气浑浊度分析公式

林振耀，吴祥定，田国良：西藏高原暖季(5~10月)大气浑浊度及消光特性的初探. 地理学报, 1984, 39(3)

(1) 用 Angstroem 经验公式：

$$\sigma_a(\lambda)=\beta\lambda^{-\alpha}$$

式中，$\sigma_a(\lambda)$ 为测点上空整层垂直气柱内气溶胶对太阳辐射的消光系数；λ 为波长；α为取决于气溶胶大小尺度的指数(气溶胶粒子指数)；β为 Angstroem 浑浊度系数。

(2) 消光方程：

$$I_{\Delta\lambda}=\int\Delta\lambda I_\lambda\mathrm{d}\lambda=\int\Delta\lambda I_{0\lambda}P_\lambda^{m(z)}\mathrm{d}\lambda$$

式中，$\Delta\lambda$ 为波段内的直接太阳辐射；$I_{0\lambda}$ 为太阳光束在地球大气以外波长 λ 处的辐照率；

$$P_\lambda=\exp(-\sigma_\lambda)=\exp\{-[\sigma_R(\lambda)+\sigma_a(\lambda)+\sigma_s(\lambda)]\}$$

为大气对波长λ的光谱透明度，其中σ_λ为波长λ处的单位大气质量消光系数，$\sigma_R(\lambda)$，$\sigma_a(\lambda)$和$\sigma_s(\lambda)$分别为分子散射消光系数、气溶胶消光系数和大气中某些气体的选择吸收消光系数；$m(z)$为天顶距Z时的相对大气质量。

(3) 高原大气浑浊因子：

$$\sigma_{\Delta\lambda} = T_{\Delta\lambda}\sigma_R(\Delta\lambda)$$

式中，$T_{\Delta\lambda}$为大气浑浊因子；$\sigma_{\Delta\lambda} = \sigma_R(\lambda) - \sigma_a(\lambda) - \sigma_s(\lambda)$。

卫星多谱段扫描图像MS的定位计算公式

李树楷：卫星多谱段扫描图像MS的定位问题．地理学报，1984，39(4)

(1) 理想扫描状态下任一像元的似平面坐标系坐标值：

$$y = f \cdot \tan\theta$$

$$x = f \cdot \tan(ML \cdot \Delta\delta)$$

式中，$\theta = \left(I - \frac{N+1}{2}\right) \cdot \Delta\theta$，为$y$方向视野角；$ML = M_{OD}(J-1.6)+1$；$\Delta\theta$为扫描方向瞬时采样角；$\Delta\delta$为卫星前进方向瞬时采样角；$N$为一根扫描线的总像元数；$I$为像元坐标数；$J$为扫描坐标数。

(2) 采样不等速情况下任一像元的似平面坐标系坐标值：

$$y = f \cdot \tan(\theta + v)$$

$$x = f \cdot \tan(ML \cdot \Delta\delta)$$

式中，视野角的变化角v在一个扫描断面里是像元数I坐标的函数，对2，3号卫星：$v = a_1 I(I - N/2)(I-N)$或$v = a_0 + a_1 I + a_2 I^2 + a_3 I^3$，对4号卫星：$v = 2\arcsin\{A\sin W[t_0 + (I-1)t]\}$，其中$A$为正弦函数曲线摆动幅度，$W$为扫描镜的角速度，$t_0$为扫描开始时间，$t$为采样时间。

(3) 存在三轴倾斜情况下任一像元的似平面坐标系坐标值：

$$x = -f\frac{a_1(X-X_0)+b_1(Y-Y_0)+c_1(Z-Z_0)}{a_3(X-X_0)+b_3(Y-Y_0)+c_3(Z-Z_0)}$$

$$y = -f\frac{a_2(X-X_0)+b_2(Y-Y_0)+c_2(Z-Z_0)}{a_3(X-X_0)+b_3(Y-Y_0)+c_3(Z-Z_0)}$$

式中，x，y为地面点的似平面坐标；X_0，Y_0，Z_0是假定投影中心O的坐标；X，Y，Z是地面点的坐标；f为假定投影主距。

半球面反射系数计算公式

Kimes D S，Sellers P J：从天底角或直射辐射的遥感值推断全球能量收支的地球表面半球面反射系数．Remote Sensing of Environment，1985，18

$$R_\lambda = \pi^{-1}\iint \rho_\lambda(\theta,\phi)\sin\theta\cos\theta \, d\theta \, d\phi$$

式中，$\rho_\lambda(\theta,\phi)$是直接反射系数因子；$\theta$和$\phi$分别是目标的顶角和方位角。

热红外扫描影像分析公式

马蔼乃：热红外扫描影像的立体观察实验．地理学报，1985，40(3)

(1) 扫描影像的像点位移公式：

$$\delta = \frac{R h}{2H}\sin 2\varphi$$

式中，$\frac{R}{2}$为仪器常数；h为地面起伏；φ为扫描角；H为航高。

(2) 地形的相对高差：

$$h = \frac{1}{2}\left[(2H+I) + \sqrt{I(4H+I)}\right]$$

式中，h地形的相对高差；H为相对航高；I为由视差角和显微镜镜筒旋转半径等确定的参数。

植被雷达后向散射与辐射发射的回归模型

Eom H J：植被雷达后向散射与辐射发射的回归模型．Remote Sensing of Environment，1986，19

(1) 后向散射模型：

雷达后向散射系数σ^o由三个成分组成：体积成分σ_v^o，表面成分σ_s^o，相互作用成分σ_I^o：

$$\sigma^o = \sigma_v^o + \sigma_s^o + \sigma_I^o$$

式中，σ_v^o表示单独植被的后向散射；σ_s^o表示经过植被冠层衰减过的地面后向散射；σ_I^o表示经过地面与植被冠层间多重散射产生的后向散射。

$$\sigma_v^o = P_1\omega(1+P_2 x + P_3 x^2)[1-\exp(-P_4\tau/\mu)]\mu\,,\quad 0<\tau<3$$

$$\sigma_v^o(\omega,\mu;\tau>3) \cong \sigma_v^o(\omega,\mu;\tau=3)$$

式中，$x = \omega\tau$；$\mu = \cos\theta$；P_1，P_2，P_3和P_4是优化参数；θ，ω和τ分别是入射角、单重散射漫反射率和光学厚度。

$$\sigma_v^o = \exp(-2\tau/\mu)\cdot\sigma_{PP}^o$$

式中，σ_{PP}^o 是随机粗糙表面的后向散射系数。

相互作用项取下面的形式：

$$\sigma_I^o = 2\sigma_v^o R_P^2 \exp(-\tau/\mu)$$

式中，R_P是 P 极化的 Fresnel 电磁反射系数。

(2) 发射模型：

植被的发射 T 由三项构成：体积项 T_v、表面项 T_s、相互作用项 T_I：

$$T = T_v + T_s + T_I$$

且

$$T_v = (1-\omega)[1-\exp(-\tau/\mu)]\times(1+q_1X+q_2X^2+q_3X^3)$$

$$T_s = (1-R_P^2)\exp(-\tau/\mu)\times(1+q_4X+q_5X^2+q_6X^3)$$

$$T_I = (1-\omega)[1-\exp(-\tau/\mu)]\times R_P^2\exp(-\tau/\mu)(1+q_7X+q_8X^2-q_9X^3)$$

式中，$X=\omega\tau$；$q_i\,(i=1,2,\cdots,9)$ 为参数。

叶片尺寸对玉米微波后向散射影响的估算模型

Paris J F：叶片尺寸对玉米的微波后向散射的影响．Remote Sensing of Environment，1986，19

(1) 对给定植被冠层，如果介质是多色散的，则：

$$\eta = \int_0^\infty n(a)\sigma(a)\mathrm{d}a$$

$$\kappa = \int_0^\infty n(a)Q(a)\mathrm{d}a$$

式中，η 是植被冠层中单位体积的后向散射截面积的和；κ 是单位体积消光截面积之和；σ 是后向散射截面积；Q 是消光截面积；$n(a)$是尺度分布函数，其给出了单位体积内单位尺度间隔内的散射体的数目；a 表示尺度大小。

(2) 修正模型表示为：

$$\sigma^0 = [C\langle A_l\rangle^D\cos\theta\cdot 2E\langle m_w\rangle](1-t^2)+(F_1+F_2m_s)t^2$$

式中，$t=\exp[-N_a E\langle m_w\rangle\sec\theta]$；$\sigma^0$ 是冠层与土壤组合体的后向散射系数；θ 是传感器观察角；m_w 是散射元的水分质量；m_s 是土壤水分含量；N_a 是散射元的面积密度；C、D、E、F_1 和 F_2 是待定系数。

冠层反射系数，光合作用和蒸发(Ⅱ) 之间的线性相互依赖关系模型

Sellers P J：冠层反射系数，光合作用和蒸发（Ⅱ）之间的线性相互依赖关系中的生物物理因子．Remote Sensing of Environment，1987，21

(1) 在冠层中入射的直射辐射通量的上行和下行漫射通量可用下面的方程描述：

$$-\bar{\mu}\frac{\mathrm{d}I\uparrow}{\mathrm{d}L}+[1-(1-\beta)\omega]I\uparrow-\omega\beta I\downarrow=\omega\bar{\mu}K\beta_0e^{-KL}$$

$$\bar{\mu}\frac{\mathrm{d}I\downarrow}{\mathrm{d}L}[1-(1-\beta)\omega]I\downarrow-\omega\beta I\uparrow=\omega\bar{\mu}K(1-\beta_0)e^{-KL}$$

式中，$I\uparrow$ 和 $I\downarrow$ 分别是对入射通量进行归一化处理后的上行和下行漫射通量；μ 是入射光束的顶角的余弦值；K 是对直射光束单位叶面积的光学厚度；$\bar{\mu}$ 是单位叶面积漫射光学厚度的倒数的平均值；ω 是散射系数；L 是累积叶面积指数；β 和β_0分别是漫射和直射光束的向上散射参数。

(2) 上面的方程的解为：

$$I\uparrow=\frac{h_1}{\sigma}e^{-KL}+h_2e^{-hL}+h_3e^{hL}$$

$$I\downarrow=\frac{h_4}{\sigma}e^{-KL}+h_5e^{-hL}+h_6e^{hL}$$

式中，σ、h 和 $h_i\,(i=1,2,\cdots,6)$ 是常数。

(3) 叶的光合作用率：

$$P=\left(\frac{a_1F\downarrow}{b_1+F\downarrow}-R_d\right)f(\psi_1)\cdot f(T_c)\cdot f(\delta e)$$

(4) 叶片的气孔阻力：

$$r_s=\left(\frac{a_2}{b_2+F\downarrow}+c_2\right)\cdot[f(\psi_1)f(T_c)f(e_a)]^{-1}$$

式中，P 是叶片的光合作用率；$F\downarrow$ 是入射 PAR 的法向(相对于叶片)通量密度；R_d 是暗呼吸作用率；a_1，b_1，a_2，b_2 和 c_2 是常数。$f(\psi_1)\cdot f(T_c)\cdot f(\delta e)$ 是对叶片水分势 ψ_1、温度 T_c 及水蒸气压的亏值 δe 的修正因子。

基于多重散射方程解析解的冠层反射模型

Camilio P：基于多重散射方程解析解的冠层反射模型．Remote Sensing of Environment，1987，23

(1) 为了解释冠层结构，多重散射方程修正为：

$$u\frac{\mathrm{d}I(L,u,\phi)}{\mathrm{d}L}=$$
$$G_sI(L,u,\phi)-\frac{G_s}{4\pi}\int_{-1}^{1}\mathrm{d}u'\int_{0}^{2\pi}\mathrm{d}\phi'[p(u,\phi,u',\phi')I(L,u',\phi')]-$$
$$\frac{F}{4\pi}G(u_0,\phi_0)\exp\left[\frac{-G(u_0,\phi_0)L}{u_0}\right]p(u,\phi,-u_0,\phi_0)$$

式中，通量 I 是在光学厚度 L(累积叶面积指数)处、方向为(θ,ϕ)的辐射束，θ 是顶角，φ 是方位角，这里用变量 $u=\cos\theta$ 来代替 θ；单散射相函数 p 是从方向(u',ϕ')散射到方向(u,ϕ)的概率，在冠层中叶片不同角度分布的效应用 $G(u_0,\varphi_0)$及常数因子 G_s 来表示。

(2) 方程的解为：

$$I=fI_{h0}+(1-f)I_d$$

漫射通量 I_{h0} 为：

$$I_{h0}(L,u)=A_0\left[\exp\left(\frac{k_0L}{2}\right)\right]\frac{1+a_0u}{1-k_0u}+B_0\left[\exp\left(-\frac{k_0L}{2}\right)\right]\frac{1-a_0u}{1+k_0u}$$

式中，A_0，B_0，a_0和 k_0是参数。

直接通量 I_d 为：

$$I_d(L,u,\phi)=A_1e^{k_1L}\frac{1+a_0u}{1-k_0u}+B_1e^{k_0L}\frac{1-a_0u}{1+k_0u}+h_0\left[\exp\left(-\frac{GL}{u_0}\right)\right]\frac{1+b_0u}{1+Gu/u_0}+h_1\left[\exp\left(-\frac{GL}{u_0}\right)\right]\frac{\sqrt{1-u^2}}{1+Gu/u_0}\cos(\phi_0-\phi)$$

式中，A_1，B_1，h_0，h_1和 b_0是参数。

矿物和岩石的介电性模型

肖金凯：矿物和岩石的介电性质研究及其遥感意义．环境遥感，1988，3(2)

1. 影响矿物岩石介电特性的因素

(1) 理想的介电-频率特性关系模型：

$$\varepsilon'=\varepsilon_\infty+(\varepsilon_s-\varepsilon_\infty)\int_0^\infty\frac{F(\tau)\mathrm{d}\tau}{1+(\omega\tau)^2}$$

$$\varepsilon''=(\varepsilon_s-\varepsilon_\infty)\int_0^\infty\frac{F(\tau)\mathrm{d}\tau}{1+(\omega\tau)^2}$$

式中，$\int_0^\infty F(\tau)\mathrm{d}\tau=1$ 为弛豫时间分布函数；ε_s 为静态介电常数；ε_∞ 是频率为高频时的介电常数。

(2) 矿物岩石-水系统的 ε' 和吸附水的体积百分含量 S_w 的关系模型：

$$\varepsilon'=\varepsilon_0'^{\rho}\varepsilon_w'^{S_w}$$

式中，ρ 为矿物岩石的孔隙度；ε_0' 为干燥状态下孔隙度为零时矿物岩石的复介电常数实部；ε_w' 为水的复介电常数实部。

2. 在微波遥感中的意义

(1) 微波遥感中各类地物的亮度温度 T_B 模型：

$$T_B=eT$$

式中，e 为微波发射率；T 为物体温度。

如果能量守恒，对一个非磁的、各向同性的、绝缘的、具有零温度梯度热平衡光滑平坦表面半无限延展的物体，它的发射率等于它的吸收率，则有 $e(h,v)=1-R(h,v)$，(h,v)表示极化状态，反射率 R 可由 Fresnel 反射系数公式给出：

$$R_{(h)}=\left|\frac{\cos\theta-\sqrt{\varepsilon-\sin^2\theta}}{\cos\theta+\sqrt{\varepsilon-\sin^2\theta}}\right|^2$$

$$R_{(v)}=\left|\frac{\varepsilon\cos\theta-\sqrt{\varepsilon-\sin^2\theta}}{\cos\theta+\sqrt{\varepsilon-\sin^2\theta}}\right|^2$$

式中，θ 为入射角；$\varepsilon=\varepsilon'+i\varepsilon''$。

(2) 对一个在有损介质中传播的电磁波而言：

$$\alpha=\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\frac{\varepsilon'}{2}\left[\sqrt{1+\left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon}\right)^2}-1\right]}$$

$$\beta=\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\frac{\varepsilon'}{2}\left[\sqrt{1+\left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2}+1\right]}$$

$$\delta=1/\alpha$$

$$\gamma=\delta+i\beta$$

式中，α，β，δ，γ 分别为衰减常数、相移常数、穿透深度和传播常数。

红外辐射定律及红外发射率

王品清：热红外发射率对热红外成像及其图像判读的影响．环境遥感，1988，3(3)

物体的光谱发射率 ε_λ 模型：

$$\varepsilon_\lambda=\frac{W_{\lambda物体}}{W_{\lambda黑体}}$$

式中，$W_{\lambda物体}$和$W_{\lambda黑体}$分别为物体和黑体的光谱辐射通量密度。

仿射变换的数学模型

华瑞林，鲁涛：仿射变换法在航天 MSS 数据变换中的应用 地理研究，1988，7(2)

$$\begin{cases} x = A_0 + A_1 u + A_2 v \\ y = B_0 + B_1 u + B_2 v \end{cases}$$

式中，x，y为地面坐标；u、v为图像坐标。

N个控制点的误差为：

$$M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\Delta u_i^2 + \Delta v_i^2\right)}{N}}$$

漫反射率的估算模型

Irons J R, Ranson K J, and Daughtry C S T：从直接反射系数的测量值估计大须芒草的漫反射率。Remote Sensing of Environment, 1988，25

漫反射率是 2π 度立体角内反射的总的短波辐射(0.3~3.0μm)通量与总的下行太阳辐射通量的比值：

$$\rho = \int_{0.3}^{3.0}\rho(\lambda)E(\lambda)\mathrm{d}\lambda \Big/ \int_{0.3}^{3.0}E(\lambda)\mathrm{d}\lambda$$

$$\cong \sum_{i=1}^{10}\rho_i E_i \Delta\lambda_i \Big/ \sum_{i=1}^{10} E_i \Delta\lambda_i$$

式中，λ表示波长；$\Delta\lambda_i$表示一个光谱波段的宽度；ρ_i表示对波段i在一个特定的观察角的光谱反射系数因子；E_i表示在波段I的下行辐照度。

辐射的物理模型

Dymond J R：丘陵区辐射的非参数模型。Remote Sensing of Environment, 1988，25

$$L_x = L_r \cdot T + L_p$$

式中，L_x是遥感传感器测量到的辐射；L_r是地面目标的辐射；T是大气衰减系数；L_p是大气散射的太阳光，称为路径辐射。

大气中水蒸气效应校正的线性关系模型

Majumdar T J, Bhattacharya B B：对大气中水蒸气效应校正后陆地表面温度的求解——利用 INSAT VHRR 数据的实例研究。Remote Sensing of Environment, 1988，26

对从 INSAT 得到的 TIR 数据的校准可用下面的线性关系：

$$Y_{\text{brightness temp}} = -0.499\,X_{\text{grey level}} + 329.4$$

雷达反射率与降雨强度的关系模型

Ulbrich C W：雷达反射率因子与降雨强度的波长衰减率间的精确关系 Remote Sensing of Environment, 1988，26

$$Z = A_1 R^{a_2} f(R, n)$$

$$\lg[f(R,n)] = \sum_{i=3}^{n} a_i (\lg R)^{i-1}$$

式中，Z是反射率因子；R是降雨强度；n是求和的项数；A_1和a_i是回归系数。

基于多重散射 LOWTRAN 码的多光谱传感器数据模拟模型

Isaacs R G, Vogelmann A M：基于多重散射 LOWTRAN 码的多光谱传感器数据模拟模型。Remote Sensing of Environment, 1988，26

(1) 多重散射码：

波数为υ的辐射I_υ的路径积分为：

$$I_\upsilon[T_\upsilon(Z_T),\mu,\phi] = J_\upsilon[T_\upsilon(Z_b),\mu,\phi]\cdot T_\upsilon(Z_b:Z_T) + \int_{T_\upsilon(Z_b)}^{T_\upsilon(Z_T)=1} J_\upsilon[T_\upsilon(Z),\mu,\phi]\cdot \mathrm{d}T_\upsilon(Z)$$

式中，μ是顶角的余弦值；ϕ是相对于太阳方位角的方位角；$T_\upsilon(Z)$是水平高度为Z的层面上透射率；Z_T和Z_b分别是大气的顶部和底部的高度。太阳辐射和热辐射的源函数J_υ通过局部的发射、单散射和多重散射源项决定。

(2) 传感器波段i测量到的辐射I_i是入射辐射谱和波段响应函数$\phi_i(\lambda)$的卷积：

$$I_i = \int_{\Delta\lambda} I(\lambda)\phi_i(\lambda)\mathrm{d}\lambda \Big/ \int_{\Delta\lambda}\phi_i(\lambda)\mathrm{d}\lambda$$

从空间测量陆面温度的可行性物理基础

方正明，道彦：从空间测量陆面温度的可行性 环境遥感，1989，4(2)

(1) 发射率和温度之间的关系模型：

$$T_s = \frac{hc}{k\lambda \ln(1 + \varepsilon e^{hc/k\lambda T_b} - \varepsilon)}$$

式中，$h = 6.63\times10^{-34}$Js，为普朗克常数；$c = 3\times10^{8}\mathrm{m\cdot s^{-1}}$，为光速；$k = 1.38\times10^{-23}\mathrm{J\cdot K^{-1}}$为玻耳兹曼常数；$T_s$、$T_b$分别为热力学温度和亮度温度；$\lambda$为波长；$\varepsilon$为谱发射率。

(2) 辐射输运——源函数J模型：

$$J(\tau,\Omega)=\frac{\omega}{4\pi}\int_{4\pi}P(\tau,\Omega;\Omega')L(\tau,\Omega')\mathrm{d}\Omega'+Q(\tau,\Omega')$$

式中，τ 为光学厚度；$L(\tau,\Omega)$ 为在 τ 处沿 Ω' 方向的辐射；Ω 由天顶角 $\arccos\mu$（向下为正）和方位角 ϕ 构成；$P(\tau,\Omega;\Omega')$ 为散射函数，给出在 τ 处由 Ω' 方向入射的辐射散射到 Ω 方向的单次散射的分布模式；$\tilde{\omega}$ 为单次散射反射率；$Q(\tau,\Omega)=Q_t(\tau,\Omega)+Q_s(\tau,\Omega)+Q_{sp}(\tau,\Omega)$ 为内部源，Q_t 为热源，Q_s 和 Q_{sp} 分别为定向和镜面反射的假源，且有：

$$Q_t(\tau,\Omega)=(1-\tilde{\omega})B[T(\tau)]$$

$$Q_s(\tau,\Omega)=\frac{\tilde{\omega}E_0}{4\pi}P(\tau,\Omega;\Omega_0)e^{-\tau/\mu_0}$$

$$Q_{sp}(\tau,\Omega)=\frac{\tilde{\omega}E_0}{4\pi}R_{sp}(\mu_0)P(\tau,\Omega;\Omega_p)e^{-(2\tau_0-\tau)/\mu_0}$$

式中，$B[T(\tau)]$ 为普朗克函数；μ_0 为太阳天顶角的余弦；E_0 为入射到大气顶部的太阳光照量(垂直于太阳光束)，R_{sp} 为大气下表面的镜向反射率；τ_0 为大气层总的光学厚度。

(3) LOWTRAN 计算——平均波谱辐射模型：

$$\overline{L}^{\uparrow}=\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\phi(\lambda)L^{\uparrow}(\lambda,0)\mathrm{d}\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\phi(\lambda)\mathrm{d}\lambda}$$

式中，ϕ 为热波段内的传感器响应函数；波段范围为 $[\lambda_1,\lambda_2]$。

(4) 简化的下边界条件模型：

$$L(\lambda,\tau_0,-\mu)=$$

$$2\pi\int_0^1\mu' f_r(\lambda,-\mu,\mu')L(\lambda,\tau_0,\mu')+\varepsilon(\lambda,-\mu)B(\lambda,T_s)\mathrm{d}\mu'$$

辐射输运的数值模型

方正明，道席：从空间测量陆面温度的可行性．环境遥感，1989，4(2)

(1) 传感器的波谱特性：

$$\lambda_1+\delta\lambda\leqslant\lambda\leqslant\lambda_2-\delta\lambda,\quad \phi(\lambda)=1$$

$$\lambda_1<\lambda<\lambda_1+\delta\lambda,\quad \phi(\lambda)=\frac{\lambda-\lambda_1}{\delta\lambda}$$

$$\lambda_2>\lambda>\lambda_2-\delta\lambda,\quad \phi(\lambda)=\frac{\lambda_2-\lambda}{\delta\lambda}$$

$$\lambda>\lambda_2\text{或}\lambda<\lambda_1,\quad \phi(\lambda)=0$$

式中，λ_1 和 λ_2 为波段的下限和上限；$\delta\lambda=0.125\mu\mathrm{m}$。

(2) 波段平均发射率模型：

$$\overline{\varepsilon(T_s)}=\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\phi(\lambda)\varepsilon(\lambda)B(\lambda,T_s)\mathrm{d}\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\phi(\lambda)B(\lambda,T_s)\mathrm{d}\lambda}$$

式中，ϕ 为传感器响应函数；$\varepsilon(\lambda)$ 为谱发射率；$B(\lambda,T_s)$ 为普朗克函数；λ_1 和 λ_2 为波段的下限和上限波长。

坡地辐射场研究模型

朱志辉：坡地辐射场研究及其地理学应用．地理研究，1989,6(2)

1. 入射到典型坡面上的直接辐射

(1) 瞬时值：

$$\dot{I}_{bs}=\dot{I}_b(\dot{I}_{os}/\dot{I}_o)=\dot{I}_b(\cos\theta/\cos z)=\dot{I}_b\dot{r}_b$$

式中，$\dot{I}_{bs}$，$\dot{I}_b$ 分别为倾斜面和水平面上直接辐射通量密度；$\dot{I}_{os}$，$\dot{I}_o$ 为相应表面的天文辐射通量密度；θ 为该时刻太阳光对坡面的入射角；z 为天顶距；$\dot{r}_b$ 为相应于瞬时值的转换因子。

(2) 时总量：

$$I_{bs}=I_b\int_{\omega_i-\pi/24}^{\omega_i+\pi/24}\tau_b(\omega)\dot{I}_{os}\,\mathrm{d}\omega\Big/\int_{\omega_i-\pi/24}^{\omega_i+\pi/24}\tau_b(\omega)\dot{I}_o\,\mathrm{d}\omega$$

式中，I_{bs} 为坡面上第 i 个小时直接辐射时总量；I_b 为水平面直接辐射时总量；ω_i 为该小时中间时刻的时角。

(3) 日总量：

$$H_{bs}=H_b\int_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}}\tau_b(\omega)\dot{I}_{os}\,\mathrm{d}\omega\Big/\int_{\omega_r}^{\omega_s}\tau_b(\omega)\dot{I}_o\,\mathrm{d}\omega$$

$$\cong H_b(H_{os}/H_o)$$

$$=H_bR_b$$

式中，H_{bs}，H_b 分别为倾斜面和水平面直接辐射日总量；I_{os}，I_o 分别为相应表面的天文辐射日总量；ω_{sr}，ω_{ss} 为倾斜面日出、日没时角；ω_r，ω_s 为水平面日出、日没时角；R_b 为相应于日总量的转换因子。

(4) 月平均时总量和月平均日总量：

$$\overline{I}_{bs}=\overline{I}_b\overline{r}_b$$

$$\overline{H}_{bs}=\overline{H}_b\overline{R}_b$$

式中，$\bar{I}_{bs}$ 为月平均时总量；$\bar{H}_{bs}$ 为月平均日总量；上加横线表示月平均

2. 周围地表对坡面的反射

(1) 完全漫反射：

$$I_{rs}=0.5(I_b\rho_b+I_d\rho_d)(1-\cos\alpha)$$

$$H_{rs}=0.5H\rho(1-\cos\alpha)$$

式中，I_{rs} 为地表对坡面的漫反射；ρ_b、ρ_d 分别为地面对直接辐射和天空漫射的反射率；α 为倾角。

(2) 不完全漫反射：

$$I_{rs}=0.5I\rho(1-\cos\alpha)[1+\sin^2(z/2)](|\cos E|)$$

$$H_{rs}=\sum^{T}\left[0.5I\rho(1-\cos\alpha)\left(1+\sin^2(z/2)\right)(|\cos E|)\right]$$

式中，E 为坡面相对于太阳的方位；H 为水平面总辐射日总量。

3. 天空漫反射模式

(1) 环日模式：

$$I_{ds}=I_d r_b$$

$$H_{ds}=H_d R_b$$

式中，I_{ds}、I_d 分别为入射到坡面和水平面上的天空漫射辐射时总量；H_{ds}、H_d 为相应日总量。

(2) 各向同性模式：

$$I_{ds}=0.5I_d(1+\cos\alpha)$$

$$H_{ds}=0.5H_d(1+\cos\alpha)$$

式中，α 为坡面倾角。

(3) 晴空各向异性模式：

$$I_{ds}=0.5I_d(1+\cos\alpha)\left[1+\sin^3(\alpha/2)\right]\left(1+\cos^2\theta\sin^3 z\right)$$

(4) 全天候各向异性模式：

$$I_{ds}=0.5I_d(1-\cos\alpha)\left[1+F\sin^3(\alpha/2)\right]\left(1+F\cos^2\theta\sin^3 z\right)$$

式中，$F=1-(I_d/I)^2$ 为修正因子，I_d、I 分别为水平面漫射辐射和总辐射瞬时值(或小时值)。

(5) Hay 模式：

$$I_{ds}=I_d(I_b/I_0)r_b+0.5I_d(1+\cos\alpha)(1-I_b/I)$$

式中，I_b 为直接辐射。

4. 坡面净辐射模式

$$B_s=(H_{bs}+H_{ds}+H_{rs})(1-A_s)-F_s$$

$$F_s=F\cos\frac{\alpha}{2}-\sigma\left(\beta_m T_m^4-\beta_s T_s^4\right)\sin^2\frac{2}{\alpha}$$

式中，B_s、A_s 和 F_s 分别为坡面净辐射、反射率和有效辐射；F 为水平面有效辐射；α 为 Stefan-Boltzmann 常数；T_m 和 T_s 分别为坡面和所向地表的温度；β_m、β_s 为相应的比辐射率。

影像类型界线转绘方法

毛赞猷：卫星影像上专题类型转绘方法的分析 地理学报，1989，44(4)

(1) 对卫星影像进行高次或二次多项式变换：

$$X=a_1x+a_2y+a_{11}x^2+a_{12}xy+a_{22}y^2+III_a$$

$$Y=b_1x+b_2y+b_{11}x^2+b_{12}xy+b_{22}y^2+III_b$$

式中，III_a，III_b 均为误差余项

(2) 共线变换：

$$X=\frac{a_1x+a_2y+a_3}{c_1x+c_2y+c_3}$$

$$Y=\frac{b_1x+b_2y+b_3}{c_1x+c_2y+c_3}$$

(3) 仿射变换：

$$X=a_1x+a_2y+a_3$$

$$Y=b_1x+b_2y+b_3$$

(4) 相似变换：

$$X=kx$$

$$Y=ky$$

原始的热模型

McGuire M J, Smith J A, Balick L K et al：森林冠层的直接热辐射模型 Remote Sensing of Environment，1989，27

(1) 植被冠层的能量平衡方程的矩阵为：

$$F=\frac{1}{2}\alpha\sigma B(X)^{T}-\sigma B(X)+A+H(X)+LE(X)=0$$

式中，X 是三层植被层的层平均温度；α 是长波吸收项矢量；σ 是 Stefan-Boltzmann 常数；B 是长波发射项矢量；A 是短波吸收项矢量；H 是显热矢量；LE 是蒸散量矢量。

(2) 在方向 θ，冠层分层 (i) 中的间隙概率为：

$$P(i,\theta)=\exp(-l_{la}\cdot K/\cos\theta)$$

式中，l_{la} 是叶面积指数，即为每单位地面面积的单面叶面积；K 是在方向 θ 上的平均冠层投影；θ 是底角。

(3) 当考虑到路径长度对底角及方位角(ϕ)的变化，间隙概率表示为：

$$P_{gap}(\theta,\phi)=\exp[-K\rho_f D(\theta,\phi)]$$

式中，ρ_f 是叶片密度；$D(\theta,\phi)$ 是在角度 (θ,ϕ) 穿过冠层的累积距离。

裸地双向反射系数预测的物理模型

Pinty B, Verstraete M M, and Dickinson R E: 裸地双向反射系数预测的物理模型. Remote Sensing of Environment, 1989, 27

Hapke 模型：

一个由粒子组成的介质的双向反射系数函数为：

$$r(i,e,\psi)=\frac{\omega}{4}\frac{[1+B(g)]P(g)+H(\cos i)H(\cos e)-1}{\cos i+\cos e}$$

$$\cos g=\cos i\cos e+\sin i\sin e\cos\psi$$

$$B(g)=\frac{B_0}{1+(1/h)\tan(g/2)}$$

$$B_0=\frac{S(0)}{\omega P(0)}$$

$$P(g)=1+b\cos g+c[(3\cos^2 g-1)/2]$$

$$H(x)=\frac{1+2x}{1+2\sqrt{(1-\omega)x}}$$

式中，r 是在顶角为 i 的阳光照射下、观察顶角为 e 时表面的双向反射系数；ψ 是相对于太阳的方位角来说观察的方位角；g 是入射光线与出射光线间的相角；ω 是构成表面的粒子的平均单重散射漫反射率。

灌木草原生态系统中土壤与 *Artemisia tridentata* 的红外发射率及相应温度校正模型

Hipps L E: 灌木草原生态系统中土壤与 *Artemisia tridentata* 的红外发射率及相应温度校正. Remote Sensing of Environment, 1989, 27

到达红外温度计的辐射可表示为：

$$R=\varepsilon_c\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}B(\lambda,T)\mathrm{d}\lambda+(1-\varepsilon_c)L_\downarrow$$

式中，ε_c 是目标的体积发射率；$L_\downarrow$ 是在给定波段从天空入射的辐射。

$$R=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}B(\lambda,T_{app})\mathrm{d}\lambda$$

式中，T_{app} 是 IRT 显示的表观温度。

反射系数因子(*RF*)模型

Reiners W A, Strong L L, Matson P A et al: 用热成像图估计流过矮灌丛草原地貌的生物地球化学通量. Remote Sensing of Environment, 1989, 28

Richardson 等(1980)提出的反射系数因子(*RF*)：

$$RF=\frac{L-L_p}{(E_{sun}/d^2)\cos\phi_{sun}T_{oz}T_{ray+oz}}$$

式中，L 是照到传感器光圈上的光谱辐射；L_p 是 Rayleigh 辐射；E_{sun} 是外大气层的太阳辐照度；d 是地球与太阳之间的距离；φ_{sun} 是太阳顶角；T_{oz} 是从太阳穿过臭氧层到达地球表面的透射率；T_{ray+oz} 是从地表穿过 Rayleigh 层和臭氧层到达传感器的透射率。

光散射模型

Brakke T W, Smith J A, Harnden J M: 光线从树叶中的双向散射. Remote Sensing of Environment, 1989, 29

$$\ln\left(\frac{R}{R_m}\right)=b\ln\left[\cos\left(\frac{\theta-\theta_m}{\omega}\right)\right]$$

式中，R 是在极坐标下从叶片的法向成 θ 角的方向的反射率；R_m 是对给定的散射曲线上的最大反射率，其出现的方向角为 θ_m；ω 是角度变换。

植物冠层中的传输方程及其蒙特卡洛方法

Antyufeev V S, Marshak A L: 植物冠层中传输方程的蒙特卡洛方法. Remote Sensing of Environment, 1990, 31

(1) 植物冠层的传输方程：

$$G(\Omega)=\frac{1}{2\pi}\int(2\pi)^{-1}g_L(\Omega_L)|\Omega\cdot\Omega_L|\mathrm{d}\Omega_L$$

式中，G 是叶片法向在方向 Ω 上的平均投影；$(2\pi)^{-1}g_L(\Omega_L)$ 是叶片法向的概率分布密度，$\Omega_L\sim(\theta_L,\phi_L)$。

(2) 冠层中的辐射方式可处理为传输边界值问题：

$$-\mu\frac{\partial}{\partial\tau}I(\tau,\mu)+G(\Omega)I(\tau,\mu)=$$

$$\omega_1\int_{4\pi}P(\Omega'\to\Omega)G(\Omega')I(\tau,\Omega')\mathrm{d}\Omega'$$

$$I(0,\Omega)=I_0\delta(\Omega-\Omega_0),\quad \mu<0$$

$$I(H,\Omega)=\frac{r_s}{\pi}\int_{2\pi}|\mu'|I(H,\Omega')\mathrm{d}\Omega',\quad \mu>0$$

式中，4π、2π⁺ 和 2π⁻ 定义了相应于整个单位球体、上半球、下半球的积分；I_0 是在方向 $\Omega_0\sim(\mu_0,\phi_0)$ 上的直接的单向太阳辐射成分。

(3) 累积叶面积指数 $\tau(z)$ 定义为：

$$\tau(z)=\int_0^z u_L(z)\mathrm{d}z$$

式中，$u_L(z)$ 是单位冠层体积的总的单面叶面积；$0\leqslant z\leqslant T$，是冠层的几何厚度。

$$H=\int_0^T u_L(z)\mathrm{d}z$$

式中，H 是叶面积指数。

(4) 面积散射传输函数定义为：

$$P(\Omega'\to\Omega)=$$

$$\frac{1}{2\pi}\int g_L(\Omega_L)|\Omega'\times\Omega_L|\times f(\Omega_L;\Omega'\to\Omega)\mathrm{d}\Omega_L/G(\Omega')$$

叶相位函数 $f(\Omega_L;\Omega'\to\Omega)$ 归一为单重散射叶漫反射率 ω_L，即：

$$\int_{4\pi}f(\Omega_L;\Omega'\to\Omega)\mathrm{d}\Omega=\omega_L$$

(5) 边界值问题：

$$-\frac{\mu}{G(\Omega)}\frac{\partial}{\partial\tau}J(\tau,\Omega)+J(\tau,\Omega)=$$

$$\int_{4\pi}P(\Omega'\to\Omega)J(\tau,\Omega')\mathrm{d}\Omega'$$

$$J(0,\Omega)=G(\Omega)I(0,\Omega)\qquad(\mu<0)$$

$$J(H,\Omega)=G(\Omega)I(H,\Omega)\qquad(\mu>0)$$

式中，$J(\tau,\Omega)=I(\tau,\Omega)G(\Omega)$。

HRV 数字计数到反射系数的转换模型

Moran M S, Jackson R D, Hart G F et al: 从经过大气及视角校正的 SPOT-1 HRV 数据获取表面反射系数因子. Remote Sensing of Environment, 1990, 32

(1) 波段 i 的辐射为：

$$L_i=DC_i/c_i$$

式中，L_i 是卫星接受到的辐射；DC_i 是 HRV Level-1A 在波段 i 的数字计数；c_i 是波段 i 的校正系数。

(2) 从辐射计算表面反射系数(ρ_{ui})的公式为：

$$\rho_{ui}=(\pi\cdot L_i\cdot d^2)/(E_{si}\cdot\cos\theta_s)$$

式中，θ_s 是太阳顶角；E_{si} 是外大气层太阳在波段 i 的辐射；d 是地球与太阳间的距离；下标 u 表示未校正。

(3) 表面反射系数因子可由下面的线性方程确定：

$$\rho_{si}=A_i\rho_{ui}+B_i$$

式中，A_i 和 B_i 是根据从 RTM 得到的 L_i 和 ρ_{si} 的值经过回归拟合所得到的系数。

从兰勒曲线值得到的光学厚度成分修正估计模型

Biggar S F, Gellman D I, Slater P N: 从兰勒曲线值得到的光学厚度成分的修正估计. Remote Sensing of Environment, 1990, 32

(1) 光谱光学厚度可用下公式表示：

$$E(\lambda)=E^s(\lambda)e^{-m[\delta_r(\lambda)+\delta_a(\lambda)]}T_g(\lambda)$$

式中，$E(\lambda)$ 是地面上的太阳光谱辐射；$E^s(\lambda)$ 是外大气层的太阳光谱辐射；m 是空气质量；$\delta_r(\lambda)$ 是 Rayleigh 散射导致的光学厚度；$\delta_a(\lambda)$ 是气溶胶导致的光学厚度；$T_g(\lambda)$ 是大气层的空气透射率。

(2) Rayleigh 散射的光学厚度为：

$$\delta_r(\lambda)=\sigma_s(\lambda)\int_{z_0}^{z_t}N(z)\mathrm{d}z$$

式中，$N(z)$ 是高度函数的分子数密度；z_0 是地面海拔高度；z_t 是大气层顶部的海拔高度；$\sigma_s(\lambda)$ 是散射截面积。

(3) 气溶胶散射的光学厚度为：

$$\delta_a(\lambda)=k\lambda^{-v+2}$$

式中，$k=\pi(2\pi)^{v-2}\int_{z_0}^{z_t}C(z)\mathrm{d}z\int_0^{\infty}\frac{Q_e(x)}{x^{v-1}}\mathrm{d}x$，$Q_e(x)$ 是消光系数，$x=2\pi a/\lambda$ 是尺度参数，$C(z)$ 是正比于气溶胶密度的参数；v 是 Junge 参数。

热红外辐射解释模型

Sobrino J A, Caselles V: 植被表面的直接辐射温度的热红外辐射解释模型. Remote Sensing of Environment, 1990, 33

(1) 有效发射率参数(ε)和温度(T)可表示为：

$$\varepsilon = \varepsilon_v P_t + [\varepsilon_g + (1-\varepsilon_g)\varepsilon_v F]P_g + [\varepsilon_v + (1-\varepsilon_v)(\varepsilon_v F' + \varepsilon_g G)]P_s$$

$$T = a_g T_g + (1-a_g)T_v$$

式中，ε_g，ε_v，T_g 和 T_v 分别是地面和植被的发射率和温度；P_g，P_s 和 P_t 分别是传感器所看到的地面、植被层的顶部和边壁所占的比例；F，F' 和 G 是相应的形状因子；$a_g = \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon}[P_g + (1-\varepsilon_v)GP_s]$ 是估计地面温度对有效温度的贡献的热参数。

(2) 地面、植被层的顶部和边壁所占的比例为：

$$P_g = (1/\alpha)\sum_{i=1}^{N}\varphi_i$$

$$P_s = (1/\alpha)\sum_{i=1}^{N}\gamma_i$$

$$P_t = (1/\alpha)\sum_{i=1}^{N}\beta_i$$

式中，α 是辐射计的瞬时视场(IFOV)；φ_i、γ_i 和 β_i 分别是第 i 个单元中地面、植被层的顶部和边壁相应的视场。

不均匀方位角分布的冠层参数反演推理模型

Otterman J：通过模型反演推理具有不均匀方位角分布的冠层参数. Remote Sensing of Environment, 1990, 33

(1) 双向单重散射的一般表达式：

在水平高度 L 处叶表面的辐射 E_{leaf} 是辐照光束 $\Phi(L)$ 与单位法向矢量 $\boldsymbol{n}$ 的点乘。

$$E_{leaf} = \cos\Psi\cos\Theta_0 i\Phi(L)$$

式中，Ψ 是叶片朝上的一面法向的顶角；Θ_0 是太阳顶角；$i = 1 + \tan\Psi\tan\Theta_0\cos\delta_e$ 是直接太阳光束的辐照系数。

(2) 无限厚冠层的解为：

$$R_u(L_h) = \frac{\pi^{-1} g_h \cos\Theta_v S_h |iv|}{|i|+|v|}\exp(-|i|L_h)$$

式中，L_h 是叶面积指数在水平面 L 的投影；$L_h = \cos\psi L$；$R_u(L_h)$ 是源于水平面下的单重散射的反射沿视方向 $\boldsymbol{m}$ 穿透到水平面 L_h 的上行辐射；$g_h = g\cos\Psi$，g 是反射/透射系数；S_h 是冠层上方水平面的辐射通量；v 是系数。

$$v = i = 1 + \tan\Psi\tan\Theta_v\cos(\delta_e - \delta_v)$$

(3) 热点的性质：

一个完整的、所有叶片都一样的、包括热点区域在内的冠层的双向反射可表示为：

$$\rho_{aahs} = \frac{g_h|iv|}{|i|-|iv|^{1/2}\exp[-b(|i|-|v|)^2]+|v|}$$

式中，b 为热点参数。

双参考温度自动增益补偿微波辐射计的灵敏度模型

何明，张俊荣，赵仁宇等：采用双参考温度自动增益补偿体制的机载/陆基 13mm 成像微波辐射计的研制. 环境遥感，1990, 5(4)

$$\Delta T_{rms} = \left\{\left[1+\frac{4}{1+\tau_{agc}/\tau_{sig}}\left(\frac{T_A - T_L}{T_H - T_L}\right)^2\right]\times \frac{(T_H + T_{REC})^2 + (T_L + T_{REC})^2 + 2(T_A + T_{REC})^2}{B_{HF}\cdot\tau_{sig}}\right\}^{\frac{1}{2}}$$

式中，τ_{agc},τ_{sig} 分别是 AGC 同步检波器和信号处理积分放大的低频噪声带宽的等效积分时间常数；T_A 为天线温度信号；T_{REC} 为接收机系统噪声温度；T_H和T_L 为参考温度；B_{HF} 为系统系数。

递归计算模型

梁泽环：卡尔曼滤波器在卫星遥感影像大地校正中的应用. 环境遥感，1990, 5(4)

(1) 运动方程：

$$X(K+1) = \Phi(K+1/K)\cdot X(K) + G(K)\cdot W(K)$$

式中，向量 $X(K+1)$ 称为状态误差向量；$\Phi(K+1/K)$ 为转移矩阵；$W(K)$ 为白色噪声向量；$G(K)$ 为噪声向量系数。

(2) 测量方程：

$$Z(K) = H(K)\cdot X(K) + V(K)$$

式中，$H(K)$ 为测量矩阵；$V(K)$ 为测量噪声。

(3) 传输方程：

$$\hat{X}(K+1/K) = \Phi(K+1/K)\cdot \hat{X}(K/K)$$

$$P(K+1/K) = \Phi(K+1/K)\cdot P(K/K)\cdot \Phi^T(K+1/K)$$

式中，$P(K+1/K)$ 为误差协方差矩阵。

关于波长λ的 IFOV 散射截面，总的地面 IFOV 的反射功率模型

王铮，杨安新，刘树人等：论生态环境遥感图像识别的基础．生态学报，1990，10(4)

$$P(\lambda)=\sum_{i=1}^{m}S_i\sigma_i(\lambda)$$

式中，S_i为第i种地物在 IOFV 内所占的面积；σ_i为第i种地物散射截面。

农作物残余物的辐射通量模型

Jackson T J, O'Neill P E：微波发射与农作物残余物．Remote Sensing of Environment, 1991, 36

覆盖在土壤上的植被衰减了土壤的发射的辐射，并由于自己的发射而增加了总的上行辐射通量。这个过程的理论模型中植被被处理为两层不连续非散射介质，可表示为：

$$TB_{\rm c}=(1+R_{\rm s}\alpha)(1-\gamma)(1-\alpha)T_{\rm v}+(1-R_{\rm s})\gamma T_{\rm s}$$

式中，$TB_{\rm c}$是植被冠层的亮度温度；$T_{\rm v}$是植被的热力学温度；$T_{\rm s}$是土壤的热力学温度；$R_{\rm s}$是空气-土壤界面的反射率；α是单重散射的漫反射率；γ是植被层的透射率。

Kubelka-Munk 荧光模型(KMF)

Rosema A, Verhoef W, Schroote J et al：模拟荧光冠层相互作用以用于激光诱导荧光的测量．Remote Sensing of Environment, 1991, 37

对均匀、漫散射介质的原始 Kubelka-Munk 微分方程，其吸收和荧光发射的修正为：

$$\mathrm{d}F^{+}/\mathrm{d}z=-(k+s)F^{+}+sF^{-}+0.5P$$

$$-\mathrm{d}F^{-}/\mathrm{d}z=-(k+s)F^{-}+sF^{+}+0.5P$$

式中，F^{+}和F^{-}分别是上行和下行的荧光辐射通量密度；k和s分别是 Kubelka-Munk 吸收系数和后向散射系数。

荧光的谱发射项(P)从下面的式子计算：

$$P=\phi\eta\int_{\lambda_2}^{\lambda_1}k(E^{+}+E^{-})(\lambda/\lambda_{670})\mathrm{d}\lambda$$

式中，E^{+}、E^{-}分别是吸收的上行和下行的激发辐射通量；$\lambda_1-\lambda_2$是荧光激发波长范围；ϕ是光子荧光效率；η是荧光发射的谱分布。

卫星图像中大气影响的消除模型

Haan J F, Hovenier J W, Kokke J M Met al：卫星图像中大气影响的消除——辐射传输方法．Remote Sensing of Environment, 1991, 37

(1) 大气校正参数：

考虑一个平行于水平面的、光学厚度为b的均匀大气层，忽略极化。大气层被单色的、在垂直于传播方向的单位面积上的通量为πF的太阳光照射，方向指定为μ_0，其表面不是黑体，而是一个反射系数为A的均一朗伯表面。表面辐射可写为：

$$E_i=\frac{\mu_0[\mathrm{e}^{-b/\mu_0}+t_{\rm d}(\mu_0)]}{1-As^{*}}\pi F$$

式中，s^{*}是大气对从下面入射的辐射的球面反射系数，这是大气平均反射特性的测度；$t_{\rm d}(\mu_0)$是漫射透射率。

现考虑一个无穷小的目标，这是表面的一部分，也是朗伯的，但是其反射系数为r（称为目标反射系数），而不是背景反射系数A。一颗卫星透过大气观察目标，将会探测到一个表观目标辐射L_A：

$$L_A=L_{\rm pa}+L_{\rm pb}+L_{\rm r}$$

式中，$L_{\rm pa}$是所谓的大气路径辐射；$L_{\rm r}=(1/\pi)re^{-b/\mu}E_i$是到达卫星的辐射，$e^{-b/\mu}$表示反射光在穿过大气时的衰减；$L_{\rm pb}=(1/\pi)At_{\rm d}(\mu)E_i$是所谓的背景路径辐射，通过漫射透射率$t_{\rm d}$对视角的依赖性而表示了$L_{\rm pb}$随着角度的变化。

$$L_{\rm pa}=\mu_0R(\mu,\mu_0,\phi)F$$

$$s^{*}=\frac{2}{\pi}\int_0^{2\pi}\mathrm{d}\phi\int_0^1\mathrm{d}\mu'\mu'R^{*}(\mu',\mu,\phi)$$

$$t_{\rm d}(\mu)=\frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}\mathrm{d}\phi\int_0^1\mathrm{d}\mu'\mu'T(\mu',\mu,\phi)$$

式中，$R(\mu,\mu_0,\phi)$是双向反射函数；$T(\mu,\mu_0,\phi)$是透射函数。

(2) 大气影响的消除：

目标的反射系数r给为：

$$r=\frac{r_A-R(\mu,\mu_0,\phi)+(r_A-A_A)\mathrm{e}^{-b/\mu}t_{\rm d}(\mu)}{t(\mu)t(\mu_0)+s^{*}[A_A-R(\mu,\mu_0,\phi)]}$$

式中，r_A是表观目标反射系数；A_A是已知表观背景反射系数；$t(\mu)$是总的透射率

农作物反射光的偏振度计算模型

Rondeaux G，Herman M：农作物冠层反射光的偏振．Remote Sensing of Environment，1991，38

$$P=\frac{\rho_{pol}}{\rho_{sp}+\rho_{diff}}$$

式中，P 是冠层的偏振度；ρ_{pol} 是偏振反射因子；ρ_{sp} 是镜向反射系数；ρ_{diff} 是假设为朗伯条件下的漫反射。

利用紫外线反射率通过卫星观测估计入射光合作用有效辐射模型

Eck T F，Dye D G：利用紫外线反射率通过卫星观测估计入射光合作用有效辐射．Remote Sensing of Environment，1991，38

(1) 可能光合作用的有效太阳辐射：

可能的光合作用有效太阳辐射定义为在给定位置及一年中给定时间，在天空无云条件接收到的 PAR，

$$I_{pp}=I_{0p}\cos z[0.5(1+e^{-m^*R})e^{-m^*(\tau+\alpha x)}+0.05]$$

式中，I_{0p} 是地球外的 PAR；m^* 是计算日光照的有效空气质量；τ 表示气溶胶的散射及吸收效应；x 是臭氧量；α 是臭氧在 400~700 nm 波段的吸收系数；R 是 Rayleigh 散射系数；z 是太阳天顶角。

(2) 实际的光合作用有效太阳辐射：

$$I_{ap}=I_{pp}\cdot[1-(R-0.05)/0.90]$$

式中，I_{ap} 是实际的光合作用有效太阳辐射；R 是 TOMS UV 在 370 nm 的反射系数。

遥感研究的理论模式

金亚秋：遥感理论模式研究的几个问题．环境遥感，1991，6(4)

(1) 矢量辐射传输方程：

$$\cos\theta\frac{\mathrm{d}\bar{I}(\theta,\varphi,z)}{\mathrm{d}z}=-\bar{\bar{K}}_e(\theta,\varphi)\cdot\bar{I}(\theta,\varphi,z)+$$
$$\bar{Q}(\theta,\varphi,z)+\int\mathrm{d}\Omega'\bar{\bar{P}}(\theta,\varphi;\theta',\varphi')\cdot\bar{I}(\theta',\varphi',z)$$

式中，$\bar{\bar{K}}_e$ 为消光矩阵；$\bar{\bar{P}}$ 为多次散射的相矩阵；$\bar{Q}$ 为该随机介质中的辐射源。

(2) 场的一阶矩 Dyson 方程：

$$\left\langle\bar{E}(\bar{r})\right\rangle=\bar{E}_0(\bar{r})+\int_V\mathrm{d}\bar{r}'\left\{\bar{\bar{G}}_m(\bar{r},\bar{r}')\cdot\left\langle\bar{\bar{Q}}(\bar{r}')\cdot\bar{E}(\bar{r}')\right\rangle\right\}$$

式中，$\left\langle\bar{E}(\bar{r})\right\rangle$ 为总场的系综平均；$\bar{E}_0$ 为入射场；$\bar{\bar{G}}_m$ 为随机介质的平均并矢格林函数；$\left\langle\bar{\bar{Q}}(\bar{r}')\cdot\bar{E}(\bar{r}')\right\rangle$ 为随机介质 V 内的散射源。

(3) 随机粗糙面的散射：

$$\bar{E}_s(\bar{r})=$$
$$\int_s\mathrm{d}\bar{r}'\left[i\omega\mu_0\bar{\bar{G}}(\bar{r},\bar{r}')\cdot\hat{n}\times\bar{H}(\bar{r}')+\nabla\times\bar{\bar{G}}(\bar{r},\bar{r}')\cdot n\times\bar{E}(\bar{r}')\right]$$

底片上所得某光谱波段和该光谱波段曝光量之间的关系模型

楼中羽，牛普宁：18—23MSP 多光谱航空摄影技术．环境遥感，1991，6(4)

$$\Delta D_{\lambda_i}^{a,b}=\gamma_{\lambda_i}\left[\lg\int_{\lambda_i}E_\lambda\cdot\tau_\lambda\cdot S_\lambda\cdot\rho_\lambda^a\mathrm{d}\lambda-\right.$$
$$\left.\lg\int_{\lambda_i}E_\lambda\cdot\tau_\lambda\cdot S_\lambda\cdot\rho_\lambda^b\mathrm{d}\lambda\right]$$

式中，E_λ 为摄影光源光谱能量分布；τ_λ 为摄影滤光镜光谱透光率；S_λ 为胶片光谱感光度；$\rho_\lambda^a,\rho_\lambda^b$ 为被摄地物 a,b 的光谱亮度系数。

海冰微波辐射的数值模式

金亚秋，张俊荣，赵仁宇：海冰微波辐射的数值模式和遥感实验测量．环境遥感，1992，7(1)

(1) 海冰的模型和介电常数的计算：

由 ε_s 和 $\bar{\bar{\varepsilon}}_h$ 组成的混合物的有效的平均介电常数 $\bar{\bar{\varepsilon}}_g$ 可由下式迭代求解：

$$f_s\frac{\varepsilon_s-\varepsilon_g}{\varepsilon_0+S_1(\varepsilon_s-\varepsilon_g)}+(1-f_s)\frac{\varepsilon_h-\varepsilon_g}{\varepsilon_0+S_1(\varepsilon_h-\varepsilon_g)}=0$$

$$f_s\frac{\varepsilon_s-\varepsilon_{gz}}{\varepsilon_0+S_3(\varepsilon_s-\varepsilon_{gz})}+(1-f_s)\frac{\varepsilon_{hz}-\varepsilon_{gz}}{\varepsilon_0+S_3(\varepsilon_{hz}-\varepsilon_{gz})}=0$$

式中，$S_1=\frac{\varepsilon_0 b^{1/2}}{\varepsilon_g(2b^{1/2}+1)}$；$S_3=\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{gz}(2b^{1/2}+1)}$；$b=\varepsilon_g l_z^2/(\varepsilon_{gz}l_\perp^2)$；下标 h 表示背景介质，s 表示混合的杂质，z 为针状粒子一致取向的 $\hat{z}$ 方向，l_z 和 $l_\perp$ 分别为水平和垂直方向上的相关长度，它对应于散射元的大小。

(2) 辐射传输方程的数值解：

由传输方程解得的极化的辐射亮度温度 $\bar{T}_B(\theta_0)$ 模型：

$$\bar{T}_B(\theta_0)=\frac{1}{C}[I_v(\theta,z=0),I_h(\theta,z=0)]$$

式中，θ_c 和 θ 满足界面 z=0 处的 Snell 关系。

成像光谱仪数据分析方法

郑兰芬，王晋年：成像光谱遥感技术及其图像光谱信息提取的分析研究．环境遥感，1992，7(1)

(1) 相对反射率转换方程：

$$\rho_b = \sum F_e \cdot R_{e,b} = aDN_{i,b} + c$$

式中，ρ_b 为相对反射率；$DN_{i,b}$ 为图像灰度值；$R_{e,b}$ 为波段 b 范围内 e 波长点光谱反射率值；F_e 为与传感器光谱函数有关的加权系数．$\sum F_e = 1$；a 和 c 为斜率和截距。

(2) 对数残差模型：

$$\lg R_{ij} = \lg DN_{ij} - \lg S - \lg D + b$$

式中，R_{ij} 为相对反射率值；DN_{ij} 为图像灰度值；S 为光谱矢量的几何平均值；D 为空间灰度平均值。

多层随机介质的辐射传输方程和边界条件模型

金亚秋，张俊荣，赵仁宇：多频段微波辐射计对农作物热辐射的遥感和分层随机介质辐射传输的数值模拟。环境遥感，1992，7(2)

(1) 辐射传输方程模型：

$$\cos\theta_1 \frac{d}{dz}\bar{I}_1(\theta_1,z) = -k_{e1}(\theta_1)\bar{I}_1(\theta_1,z) + \int_0^{\pi} d\theta_1' \sin\theta_1' \bar{\bar{P}}_1(\theta_1,\theta_1')\bar{I}_1(\theta_1',z) + k_{a1}(\theta_1)C\bar{T}_1$$

式中，θ 满足 Snell 法则；$\bar{I}$ 为辐射强度；k_e,k_a 分别为消光和吸收系数；$\bar{\bar{P}}$ 为相矩阵；$C = B/\lambda^2$，B 为 Boltzmann 常数，λ 为波长。

(2) 边界条件模型：

$$\bar{I}_1(\pi-\theta_1, z=d_1) = \bar{\bar{R}}_{10}(\theta_1)\bar{I}_1(\theta_1, z=d_1)$$

$$\begin{bmatrix} I_{v1}(\theta_1, z=0) \\ I_{h1}(\theta_1, z=0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{vv} & R_{vh} \\ R_{hv} & R_{hh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{v1}(\pi-\theta, z=0) \\ I_{h1}(\pi-\theta, z=0) \end{bmatrix} + C\begin{bmatrix} T_v \\ T_h \end{bmatrix}$$

式中，$0 \leqslant \theta \leqslant \pi/2$，具有 θ 的 $\bar{I}$ 为向上的辐射强度，而具有 $(\pi-\theta)$ 的 $\bar{I}$ 为向下的辐射强度；$\bar{\bar{R}}_{ij}$ 为对角化的反射率；R_{vv},R_{hh} 为包括中间层和底层辐射贡献的同极化反射率；R_{vh},R_{hv} 为去极化反射率；T_v,T_h 分别为垂直和水平极化的中间层和底层辐射的透射贡献。

动态定位技术的基本方程

谢世杰：3DF GPS 接收机测定姿态角的原理．环境遥感，1992，7(3)

$$D_{12}^{jk}(t_1) = -\rho_{AB}^{jk}(t_1) + N_{12}^{jk}$$

$$D_{12}^{jk}(t_2) = -\rho_{AB}^{jk}(t_2) + N_{12}^{jk}$$

$$D_{12}^{jk}(t_2) - D_{12}^{jk}(t_1) = -\rho_{AB}^{jk}(t_2) + \rho_{AB}^{jk}(t_1)$$

式中，$\rho_{AB}^{jk}(t) \equiv \rho_B^k - \rho_A^k - \rho_B^j + \rho_A^j$，$\rho_\beta^\alpha$ 代表卫星 α 至天线 β 的距离；N_{12}^{jk} 为相位偏差。

频域误差改善方法

朱虹，王春涛，刘政凯：匀速直线运动降质图像复原中的误差改善．环境遥感，1992，7(4)

(1) 内插法：

$$\hat{F}(ik) = \frac{1}{2}\left[\hat{F}(ik-1) + \hat{F}(ik+1)\right] \quad i \in [1, a-1]$$

(2) 补偿法：

$$E_a(u) = \tilde{F}(u) - \tilde{A}(u) \quad u \in [0, a-1]$$

农作物生物量和水分状况的微波植被指数探测模型

Paloscia S, Pampaloni P：探测农作物生物量和水分状况的微波植被指数。Remote Sensing of Environment, 1992, 40

(1) 从陆地表面发出的到达被动式传感器天线的 p 极化微波热辐射 $B_{up}(\theta,\phi)$ 可归于陆地贡献成分 $B_{bp}(\theta,\phi)$，加上大气和天空的下行辐射 $B_{ad}(\theta,\phi)$ 在陆地的反射及在地表与传感器之间的大气中的上行辐射 $B_{au}(\theta,\phi)$：

$B_{up}(\theta,\phi) = [B_{bp}(\theta,\phi) + R_p(\theta,\phi)B_{ad}]t + B_{au}(\theta,\phi)$ 式中，$B_{bp}(\theta,\phi)$ 为沿顶角 θ 和方位角 ϕ 的 p 极化辐射的亮度 ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot Hz^{-1}$)；$t$ 是大气透射率；$R_p(\theta,\phi)$ 是陆地表面的反射率。

(2) 辐射通量 B_p 与发射体亮度温度 T_{bp} 的关系可表示为：

$$B_p(\theta,\phi) = 2kT_{bp}(\theta,\phi)/L^2$$

式中，k 是 Boltzmann 常数；L 是辐射波长。

(3) 对均匀的等温介质，T_{bp} 与发射体的热力学温度 T 的关系可用下面方程表示：

$$T_{bp}(\theta,\phi) = \varepsilon_p(\theta,\phi)T$$

式中，$\varepsilon_p(\theta,\phi)$ 是发射率。

规则丛生冠层的半球面辐射及直接辐射通量模型

Bégué A：规则丛生冠层的半球面辐射及直接辐射通量模型。Remote Sensing of Environment, 1992, 40

1. 半球面辐射通量

(1) 拦截效率 ε_i 表示为：

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{is}R_s / R_0 - \varepsilon_{id}R_d / R_0$$

式中，ε_{is} 是直接辐射的拦截效率；ε_{id} 是漫散射辐射的拦截效率；R_s 是直接辐射；R_d 是漫射辐射；R_0 是总的辐射。

$$\varepsilon_{is}(\theta_s) = \frac{3}{\pi}\int_0^{\pi/3}\varepsilon_i(\theta_s,\phi_s)\mathrm{d}\phi_s$$

$$\varepsilon_{id} = \frac{2}{\pi}\int_0^{\pi/2}\frac{3}{\pi}\int_0^{\pi/3}\varepsilon_i(\theta_s,\phi_s)\mathrm{d}\phi_s\mathrm{d}\theta_s$$

式中，θ_s 是直接入射辐射的顶角；ϕ_s 是方位角。

(2) 冠层的吸收效率可写为：

$$\varepsilon_a = \frac{a_F}{a_F + \rho_F}[\varepsilon_i + (1-\varepsilon_i)\rho_s\varepsilon_{id}]$$

(3) 冠层光谱漫反射率的公式为：

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_i\rho_F}{\rho_F + a_i} + \rho_s(1-\varepsilon_i)(1-\varepsilon_{id} + \varepsilon_{i,b})$$

式中，a_F 与 ρ_F 分别是树叶吸收与树叶反射系数；$\varepsilon_{i,b}$ 为树干的拦截效率。

2. 定向反射系数

为了计算方向辐射率，冠层被看做是一个水平同类的无限传输层。假定定向反射系数 ρ 由植被与土壤分布组成，树叶和土壤则被假定为 Lambertian，那么植被的定向发射系数可以表示为：

$$\rho_1(\theta_s,\theta_v) = \frac{\rho_F K}{(a_F + \rho_F)[K + K(\theta_v)]}\times [\varepsilon_i + \varepsilon_i(\theta_v) - \varepsilon_i\varepsilon_i(\theta_v)]$$

式中，θ_v 是观察角度；K 是总辐射衰减系数；$K(\theta_v)$ 是观察角度的衰减系数。

土壤组分的反射系数：

$$\rho_2(\theta_s,\theta_v) = \rho_s[1-\varepsilon_i(\theta_v)](1-\varepsilon_i)\{1-[\varepsilon_i + \varepsilon_i(\theta_v)]\}$$

式中，ρ_s 是土壤反射系数。

测量发射率的双温度法

Watson K：测量发射率的双温度法。Remote Sensing of Environment, 1992, 42

光谱发射率可如此确定，在一天中的两个时刻测量景物的辐射，即得到两个不同的温度，可得到下面的方程：

$$S_{ij} = E_i B_{ij}\ ,\quad i = 1,\cdots,N\ ,\quad j = 1,2$$

式中，S_{ij} 是测量信号；E_i 是光谱发射率；B_{ij} 是在温度 T_j 时的黑体辐射；下标 i 和 j 分别表示波段和时刻。确定 E_i 的一个方法是得到测量信号在两个时刻的比值：

$$S_{i2} / S_{i1} = B_{i2} / B_{i1} = \frac{\exp(C_2/\lambda_i T_1) - 1}{\exp(C_2/\lambda_i T_2) - 1}$$

上式可在两个温度 T_1，T_2 下解出。

叶片的光合作用和气孔导度估算模型

Myneni R B, Ganapol B D, Asrar G：植被冠层光合作用和气孔导度效率的遥感。Remote Sensing of Environment, 1992, 42

(1) 叶片的净光合作用(μmol $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)可表示为三个可能速率($J_E$，$J_C$，$J_S$)中的最小值与暗呼吸作用 R_d 的差值，能量驱使速率 J_E 可估计为：

$$J_E = a_\lambda \alpha F_L \frac{p_i - \Gamma_*}{p_i + 2\Gamma_*}$$

式中，$a_\lambda = 1.0-(r_D + t_D)$ 是在波长 λ 处叶片的能量吸收效率；r_D 是叶反射率；t_D 是叶片的透射率；$\alpha = 0.08$ 是量子效率；F_L 是在叶片处的 PAR 辐射；p_i 是叶片内 CO_2 的分压，是 CO_2 的补偿点。

(2) 光合作用的 Rubisco 驱使速率 J_C 的估计公式为：

$$J_C = V_m \frac{p_i - \Gamma_*}{p_i + K_c(1 + [O_2]/K_o)}$$

式中，K_c=0.03 kPa 和 K_o = 30 kPa 分别是 CO_2 的常数及在 Rubisco 反应中 O_2 相对于 CO_2 的竞争抑制常数；V_m 是 Rubisco 最大接触反应容量。

沉积限制的光合作用最大速率 J_S 是在饱和的能量和 CO_2 浓度下的净光合作用速率，大约等于 V_m 的一半。

(3) 气孔导度 S_L 的估计公式为：

$$S_L = m\frac{h_s P_L}{c_s} + b$$

式中，b 和 m 是无量纲的回归常数；h_s 和 c_s 分别是叶表面的相对湿度和 CO_2 浓度。

(4) 冠层光合作用效率 E_p (mol CO_2·mol^{-1} photons) 可通过对波谱的光合作用效率对光合作用有效辐射的波谱范围(0.4~0.7μm)积分而得：

$$E_p = \int d\lambda \left(\frac{P_{can}^{\lambda}}{X_S Y_S F_{\lambda}^{\downarrow}} \right)$$

式中，X_S 和 Y_S 是群丛的水平尺度；P_{can}^{λ} 是冠层光合作用速率(μmol·s^{-1})；$F_{\lambda}^{\downarrow}$ 是在波长 λ 处入射的辐射通量。

从 POLDER 在海洋上空的观测值获取光学及物理参数的解析模型

Bréon F M, Deschamps P Y：利用一个解析模型从 POLDER 在海洋上空的观测值获取光学及物理参数. Remote Sensing of Environment, 1993, 43

(1) 一个位于海岸的辐射仪在一个基准面对天空辐射在 850nm 及 1650nm 波段进行了测量，根据下面的公式可以从测量值 L 得出大气悬浮物的相函数 $P(\omega)$：

$$L(\omega) = \frac{I_0}{4\pi\mu_s\mu_v}\{\tau_{aer}P(\omega) + \tau_{mol}3/4[1+\cos^2(\omega)]\}$$

式中，τ_{mol} 是分子光学厚度；τ_{aer} 是大气悬浮物的光学厚度；I_0 是太阳辐射；ω 是散射角；μ_s 和 μ_v 分别是太阳及观察角度的余弦值。

(2) 海波坡度 P_{ws} 分布的最佳拟合曲线：

$$P_{ws}(Z_x, Z_y) = \frac{1}{0.343^2\pi}\exp\left(-\frac{Z_x^2 + Z_y^2}{0.293^2}\right)$$

式中，Z_x 和 Z_y 是坡度。

正射影像负片的编制模型

钱育华，翁祖平，许撝成：应用航空摄影资料编制高山峡谷地区正摄影像图. 环境遥感，1993，8(1)

(1) 影像位移模型：

$$\Delta x = \frac{1}{2} w \cdot \tan\theta_x \cdot \tan\alpha$$

$$\Delta y = \frac{1}{2} w \cdot \tan\theta_x \cdot \tan\beta$$

式中，$\Delta x, \Delta y$ 分别为 X 和 Y 方向影像位移；$\tan\alpha = \dfrac{X}{Z}$；$\tan\beta = \dfrac{Y}{Z}$；$(X, Y, Z)$ 为正射像点的模型坐标。

(2) 影像分辨力 R_Y (线对 mm^{-1}) 模型：

$$R_Y = 1/2d = 1 - \tan\theta_y \cdot \tan\beta / 2D\tan\theta_y \cdot \tan\beta$$

式中，d 为影像位移距离；D 为缝隙宽度；θ_y 为纵向坡度角。

TM 图像地物颜色的定量预测及标准化控制模型

韩利昌，侯威岭：应用光学合成方法提取 TM 影像专题信息规范化的研究. 环境遥感，1993，8(2)

(1) 彩色合成图像任意地物颜色的色度坐标模型：

$$x_i = X_i / C_i$$

$$y_i = Y_i / C_i$$

$$C_i = X_i + Y_i + Z_i$$

(2) 分层曝光时间模型：

$$t_R = \left[K_s F^2 (\beta+1)^2\right] / (E_{PR} S_{PR})$$

$$t_G = \left[K_s F^2 (\beta+1)^2\right] / (E_{PG} S_{PG})$$

$$t_B = \left[K_s F^2 (\beta+1)^2\right] / (E_{PB} S_{PB})$$

式中，K_s 为测定彩色相纸分层感光度所特定的常数；F 为光圈号数；β 为横向放大率(即放大倍数)；E_{PR}、E_{PG} 和 E_{PB} 为光源投射在彩色相纸上的三原色照度；S_{PR}、S_{PG} 和 S_{PB} 为彩色相纸的分层感光度。

(3) TM 图像最佳合成方案的选择——地物影像的总色差 ΔE 模型：

$$\Delta E_{CIE(L_i^* a_i^* b_i^*)} = \left[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2\right]^{1/2}$$

式中，L_i^* 为米制明度；a_i^* 和 b_i^* 为米制色度。

不连续植被二向性反射的几何光学与辐射传输一体化综合模型

李小文，王锦地，刘毅等：不连续植被二向性反射的几何光学与辐射传输一体化综合模型初探. 环境遥感，1993，8(3)

1. 不连续植被冠层的间隙和辐照能量的空间分布

(1) 不连续植被冠层内(从 $h_1 - R$ 到 $h_2 + R$) 任意高度的间隙率 $P(0)$模型：

$$P(0) = e^{-\lambda_0 \cdot V_\Gamma}$$

式中，λ_v 是 h_1 到 h_2 间单位体积内球心平均数(体密度)；V_Γ 是从给定高度 h，一个反置的树冠沿 θ 方向的投影被 h_1 和 h_2 平面所夹的体积。

(2) 在高度 h 处一个很薄的层 Δh 截获的辐射强度分布模型：

$$P\left(\Delta I = KL/D \cdot I_0 \cdot e^{-(KL/D)\cdot S} \cdot \Delta S\right)$$
$$= P(s|h) \cdot P_B(h)/[1 - P(0)]$$

2. 离散植被冠层 BRDF 的一次散射和多次散射

(1) BRDF 的一次散射分量：

$$\mathrm{BRDF}_1(\theta, \theta_v) = I_c + I_g + I_t + I_{tt}$$

式中，I_c 为植被冠层内一次散射向 θ_v 方向的逸出；I_g 是阳光直射地面又为观察者直接看到的反射；I_t 是阳光经冠层平均间隙率衰减后到地面为观察者直接看到的反射；I_{tt} 是阳光经冠层衰减后到达地面的反射再经冠层衰减而为观察者所见的部分，并考虑叶热点。

(2) 离散植被冠层的"开放度"系数 $K_{\mathrm{open}}(h)$ 模型：

$$K_{\mathrm{open}}(h) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} P\left(n = 0|h, \theta\right) \sin 2\theta \mathrm{d}\theta$$

海岸线长度模型

顾其钧，杨海浪，赵锐等：皮亚诺扫描分形基图像编码与压缩．环境遥感，1993，8(4)

$$L(y) = ay^{1-D}$$

式中，D 为海岸线的分形维数；a 为一常数。

迁飞轨迹模型

翟振益：褐飞虱迁飞的雷达观测与轨迹研究．环境遥感，1994，9(1)

$$\begin{cases} U(x, y) = \sum_{i=0}^{n}\left(u_i(x_i, y_i)/R_i^2\right) \Big/ \sum_{i=0}^{n}\left(1/R_i^2\right) \\ R_i^2 = |x_i - x|^2 + |y_i - y|^2 \end{cases}$$

式中，$U(x,y)$ 为轨迹线上某点 (x,y) 的平均风速；u_i 为点 (x,y) 周围某气象站 i 所测得的风速；(x_i, y_i) 为某气象站 i 的坐标；n 为以点 (x, y) 为圆心，500km 为半径的圆内的气象站的个数。

AVHRR 图像大气影响校正模型

秦益，田国良：NOAA-AVHRR 图像大气影响校正方法研究及软件研制．环境遥感，1994，9(1)

1. 在可见光及近红外波段地气系统的辐射场描述

(1) 散射方程：

$$\mu\frac{\mathrm{d}I(\tau,\Omega)}{\mathrm{d}\tau} = I(\tau,\Omega) - \frac{\tilde{\omega}}{4\pi}\int_{4\pi} I(\tau, \Omega')P(\Omega, \Omega')\mathrm{d}\Omega' -$$
$$\frac{\tilde{\omega}}{4\pi}\pi F_0 P(\Omega, -\Omega_0)\exp(-\tau/\mu_0)$$

式中，$I(\tau, \Omega)$ 为光学厚度 τ 处，Ω 方向的辐射强度；$\tilde{\omega}$ 为该大气层的单次散射反照率；$-\Omega_0$ 为太阳入射方向，负号表示向下；μ_0 为太阳天顶角余弦；πF_0 为大气顶的太阳辐射通量；P 为散射相函数。

(2) 连续性条件：

$$I^l(\tau^l, \mu) = I^{l+1}(\tau^l, \mu) \qquad (l = 1, 2, \cdots, N)$$

式中，N 为总的层数。

(3) 边界条件：

在大气顶不存在漫散辐射：

$$I^1(0, -\mu) = 0$$

在大气底散射强度为：

$$I^N(\tau^N, +\mu) = \frac{A_S}{\pi}\left[F_{dif}^{\downarrow}(\tau^N) + \mu_0\pi F_0 \exp(-\tau^N/\mu_0)\right]$$

式中，$F_{dif}^{\downarrow}(\tau^N) = \int_0^{2\pi}\int_0^1 I(\tau^N, -\mu, \varphi)\mu\mathrm{d}\mu\mathrm{d}\varphi$ 为大气底向下的漫射通量；A_s 为地表漫反射率。

2. 在热红外波段辐射场的描述——传输方程

$$L_\lambda(\theta) = \varepsilon_\lambda B_\lambda\left[T(P_s)\right] \tau_\lambda(P_s, \theta) +$$
$$\frac{1-\varepsilon_\lambda}{\pi}F^{\downarrow}(P_s) \tau_\lambda(P_s, \theta) +$$
$$\int_{P_s}^{0} B_\lambda\left[T(P')\right]\frac{\mathrm{d}\tau_\lambda(P', \theta)}{\mathrm{d}P'}\mathrm{d}P'$$

式中，$L_\lambda(\theta)$ 为大气顶 θ 方向的辐射强度；ε_λ 为地表发射率；$B_\lambda(T)$ 为普朗克函数；$T(P_s)$ 为地表温度；$F^{\downarrow}(P_s) = \int_0^{2\pi}\int_0^1 L_\lambda(P_s, -\mu)\mu\mathrm{d}\mu\mathrm{d}\varphi$ 为大气向下辐射通量；$T(P)$ 为 P 气压处空气温度；$\tau_\lambda(P, \theta)$ 为沿 θ 方向、从气压 P 处到大气顶的透过率。

多次散射及热红外辐射计算

秦益，田国良：NOAA-AVHRR 图像大气影响校正方法研究及软件研制．环境遥感，1994，9(2)

(1) 地气系统反照率模型：

$$A = P_1 + P_2A_s + P_3A_s^2 + P_4A_s^3$$

式中，$P_i = H_i/I_r$,$(i = 1,2,3,4)$；I_r 为到达传感器入口处的辐射强度；A_s 为地表反射率。

(2) 地表温度T_s模型：

$$T_s = g_1(T_b) + g_2(T_b)\bar{\varepsilon}$$

式中，T_b 为亮度温度；$\bar{\varepsilon}$ 为波段平均发射率；g_1 和 g_2 为任意形式的函数。

二维 RGS 法模型

塔西浦拉提·特依拜，大林成行，小岛尚人：遥感卫星图像处理中的一种新方法 — 二维 RGS 法　环境遥感，1995，10(2)

$$X_1^{(k+1)} = X_1^{(k)} + \frac{d}{h_{11}}\left(Y_1 - \sum_{j=1}^{N} h_{1j}\cdot X_j^{(k)}\right)$$

$$X_i^{(k+1)} = X_i^{(k)} + \frac{d}{h_{ii}}\left(Y_i - \sum_{j=1}^{i-1} h_{ij}\cdot X_j^{(k+1)} - \sum_{j=1}^{N} h_{ij}\cdot X_j^{(k)}\right)$$

式中，X_i 为 i 点的 CCT 值；k 为重复次数；h_{ij} 为传递函数的最大值；d 为加速系数；N 为一行的数据数。

CCD 相机数据的系统几何校正模型

王新民：遥感卫星 CCD 相机数据的系统几何校正，环境遥感，1994，9(2)

(1) 棱镜分光 CCD 数据的几何校正：
点(p,y)对点(p_0,y_0)的调整量：

$$\Delta p = -\frac{\theta_{HF}}{\theta_{fv}} + \frac{p_1 - p_0}{\sigma_1}\sigma_{HF}$$

$$\Delta y = \frac{y_1 - y_0}{\sigma_1}\sigma_{HF}$$

(2) 非棱镜分光 CCD 数据的几何校正：
点(p,y) 与点(p_0,y_0)的差：

$$\Delta p_m = \frac{p_1 - p_0}{\sigma_1}\delta\sigma_m$$

$$\Delta y_m = \frac{y_1 - y_0}{\sigma_1}\delta\sigma_m$$

多成分植被冠层的双向反射模型

Wenhan Q：多成分植被冠层的双向反射模型　Remote Sensing of Environment，1994，46

(1) 植物冠层中的辐射传输方程可表示为：

$$-\mu\frac{\partial I(z,r)}{\partial z} + \sum_i \lambda_i u_i(z)G_i(z,r)I(z,r) =$$

$$\frac{1}{\pi}\int_{4\pi}\sum_i u_i(z)\Gamma_i(z,r',r)I(z,r')\mathrm{d}\Omega' \quad +Q(z,r)$$

$$I(0,r) = I_D(r) + I_0\delta(r - r_0)\,,\quad \mu < 0$$

$$I(h,r) = \frac{1}{\pi}\int_{2\pi^-} R_S(r',r)|\mu'|I(h,r')\mathrm{d}\Omega'\,,\quad \mu > 0$$

(2) 植被总的反射率为：

$$R(r_0,r) = R_C^1(r_0,r) + R_S^1(r_0,r) + R^M(r_0,r)$$

$$R_C^1(r_0,r) = R_{CI}^1(r_0,r) + R_{CD}^1(r_0,r)$$

$$R_{CI}^1(r_0,r) = \frac{\beta}{\mu|\mu_0|}\int_0^h\sum_i \mu_i(z)\,\Gamma_i(z,r_0,r)p(z,r_0,r)\mathrm{d}z$$

$$R_{CD}^1(r_0,r) =$$

$$\frac{1-\beta}{\mu}\int_0^h\sum_i \mu_i(z)\int_{2\pi^-}\Gamma_i(z,r',r)p(z,r',r)\mathrm{d}(r')\Omega'\mathrm{d}z$$

$$R_S^1(r_0,r) = R_{SI}^1(r_0,r) + R_{SD}^1(r)$$

$$R_{SI}^1(r_0,r) = \beta R_S(r_0,r)p(h,r_0,r)$$

$$R_{SD}^1(r) = (1-\beta)\int_{2\pi^-} R_S(r',r)|\mu'|I_D(r')p(h,r',r)\mathrm{d}\Omega'$$

$$R^M(r_0,r) = \frac{A_M(r_0)A_M(r)}{2\int_{-1}^{0} A_M(r_0)|\mu_0|d\mu_0}$$

式中，β 是直接入射占总的入射辐射的比例；R_{CI}^1 和 R_{CD}^1 分别是 R_C^1 从直接入射和漫射的辐射中得到的部分；R_{SI}^1 和 R_{SD}^1 是类似的 R_S^1 中的部分。

土壤反射率可给模型

Wigneron J P, Kerr Y, Chanzy A et al：从对大豆地的被动微波测量反演表面参数　Remote Sensing of Environment，1994，46

$\Gamma^p = [(1-Q)\Gamma^{sp}(\theta,p) + Q\Gamma^{sp}(\theta,q)]\exp(-h_r\cos^2\theta)$　式中，$h_r = 4\cdot(2\pi/\lambda)^2\sigma^2$；$p$ 代表偏振方向垂直(v)或水平(h)；$\Gamma^{sp}(\theta,p)$ 是 p 偏振镜向反射率；θ 是视角；λ 是真空波长；h_r 和 Q 分别称为粗糙度和偏振混合参数。

锥形树干模型

Lang R H, Chanhan N S, Ranson K J et al：从一个红松群丛返回的 SAR P-波段信号的建模，Remote Sensing of Environment，1994，47

(1) 中心在 $z=0$ 的圆柱体的并向量散射振幅表示为：

$$f(o,i)=2\pi^2(I-oo)\cdot\tilde{t}(k_0o,k_0i)\cdot(I-ii)$$

式中，I 是单位并向量；$\tilde{t}$ 是转变核的傅氏变换；t 是转变核，如果圆柱体的中心在 Z 方向移动 z_j，则新转变核 $t_j(x,x')=t(x-zz_j,x'-zz_j)$，这里 z 是 Z 方向的单位向量。

(2) 中心在 $z=z_j$ 的第 j 个圆柱体的并向量散射振幅 $\tilde{f}^{(j)}$ 可写为：

$$\tilde{f}^{(j)}(o,i)=f^{(j)}(o,i)e^{ik_0z_j(i-o)\cdot z}$$

式中，$\tilde{f}^{(j)}(o,i)$ 是中心在原点的第 j 个圆柱体的并向量散射振幅。

一串圆柱体的散射振幅可以通过把所有的圆柱体的贡献求和而得：

$$f(o,i)=\sum_{j=1}^{n}f^{(j)}(o,i)e^{ik_0z_j(i-o)\cdot z}$$

有效辐射计算的修正模型

Smith J A, Goltz S M: 利用简化的短波有效辐射计算的修正模型. Remote Sensing of Environment, 1994, 47

(1) 对一个4层系统的冠层的散射单元 i，短波有效辐射的简化方程为：

$$B_i=E_i+\chi_i\sum_{j=1}^{4}B_jS_{ij}$$

式中，S 是热模型的长波矩阵；i 表示辐射源的层；E_i 发射项可看做是被散射的截留的阳光通量。

$$E_i=\chi_iE_{\text{total}}S_{\text{sky},i}$$

式中，$E_{\text{total}}=1$；冠层散射系数 χ_i 取为叶片的反射率与透射率的平均值的一半。

(2) 吸收的阳光通量(A_i)通过下式计算：

$$A_i=1/2a_i^{\text{shortwave}}\left(E_{\text{total}}S_{\text{sky},i}+\sum_j B_jS_{ij}\right)$$

式中，i 表示冠层的层数；a_i 是植被冠层的第 i 层的长波吸收率。

双向反射测量值的数学模型

Abuelgasim A A, Strahler A H: 对ASAS在俄勒冈针叶林断面收集的双向反射测量值的建模. Remote Sensing of Environment, 1994, 47

(1) 量 M_i 可定义为在光照方向的互遮蔽比例：

$$M_i=1-\frac{1-e^{-\lambda\pi R^2\sec\theta_i'}}{\lambda\pi R^2\sec\theta_i'}$$

式中，$\pi R^2\sec\theta_i'$ 是树冠在地面的投影，定义了球状体的密度。

(2) 在观察方向上的互遮蔽比例定义为：

$$M_v=1-\frac{1-e^{-\lambda\pi R^2\sec\theta_v'}}{\lambda\pi R^2\sec\theta_v'}$$

AVHRR的双向反射效应及其复合的数学模型

Cihlar J, Manak D, Voisin N: AVHRR的双向反射效应及其复合. Remote Sensing of Environment, 1994, 48

(1) AVHRR波段1和2的传感器校正可利用下式：

$$L^*=(Q-O)/G$$

式中，$G=a\cdot D+b$；$O=c\cdot D^2+d\cdot D+e$；L^* 为表观辐射；Q 为数字信号电平；O 为偏移；G 为增益；a 为斜率系数；D 为从发射起的天数；b 为截距系数；c,d,e 为系数。

(2) 辐射值通过下面的关系转换为反射率：

$$\rho_n^*=\frac{\pi d_s^2}{E_{o,n}\cos\theta_s}\cdot L_n^*$$

式中，ρ_n^* 是在传感器高度上波段 n 的表观反射率；L_n^* 是在传感器高度上波段 n 的表观辐射；d_s 是太阳距离；$E_{o,n}$ 是外大气层在波段 n 的太阳辐射；θ_s 是太阳天顶角；n 是波段数。

(3) 对所有覆盖类型计算其波谱反射率 r 的一般公式如下：

$$r_i=A_i\theta_v^2+B_i\theta_v\cos(\Delta\varphi)+c_i$$

式中，$A_i=a_{i,0}+a_{i,1}\theta_s+a_{i,2}\theta_s^2$；$B_i=b_{i,0}+b_{i,1}\theta_s$；$C_i=c_{i,0}+c_{i,1}\theta_s+c_{i,2}\theta_s^2$；$\theta_s$、$\theta_v$ 和 $\Delta\varphi$ 分别是太阳天顶角、卫星天顶角和相对方位角；a,b,c 是系数；i=1,2 表示AVHRR的波段数。

一维离散坐标冠层反射模型

Privette J L, Myneni R B, Tucker C J et al: 一维离散坐标冠层反射模型的可逆性. Remote Sensing of Environment, 1994, 48

经验数据拟合的目标函数的修正形式：

$$\varepsilon_p^2=\sum_{j=1}^{n}[r_j-r_{jm}]^2+\sum_{k=1}^{p}[(x_k-x_{kh})^2 w_k]^2$$

式中，r_j 是给定扫描角度及太阳角度的直接反射率；r_{jm} 是几何类比模型的估计值；n 是样本数目；x_k 是第 k 个参数的值；x_{kh} 是第 k 个参数的极限值；p 是限制条件的数目；w_k 是惩罚权重。

表面温度与蒸散量的计算模型

Seguin B, Courault D, Guérif M：利用卫星数据从局部尺度到区域尺度的转换方法的应用——表面温度与蒸散量的计算．Remote Sensing of Environment, 1994, 49

(1) 日蒸散量 DT_d 与瞬时测量值 T_s-T_a 的关系可表示如下：

$$ET_d=R_n+a-b(T_s-T_a)$$

式中，R_n 是净辐射通量；T_s 和 T_a 分别是表面和大气温度；a 和 b 是依赖于局部环境的常数。

(2) ET_d 的 10 天或月总量可表示为：

$$\sum ET_d=\sum R_n+a-b\sum(T_s-T_a)$$

T_s 可采用分割窗方法根据裸地(T_{sg})与茂密的植被冠层(T_{sv})的不同关系计算：

$$T_{sg}=3.1+3.2T_4-2.2T_5$$

$$T_{sv}=-2.4+3.6T_4-2.6T_5$$

式中，T_4 和 T_5 分别是利用 AVHRR 的波段 4 和 5 计算得到的温度。

$$T_s=CVT_{sv}+(1-CV)T_{sg}$$

式中，$CV=a\mathrm{NDVI}$，这里 NDVI 是标准差植被指数，a 由 NDVI 的最大值和最小值决定。

估计植被冠层有效衰减系数的微波传输模型

Chuah H T, Kung W L：估计植被冠层有效衰减系数的微波传输模型．Remote Sensing of Environment, 1994, 50

(1) 多重散射的微波传输：

$$I_n(\Omega,R)=\{P(\Omega_{n-1}-\Omega_n)W_n\}\{P(\Omega_{n-2}-\Omega_{n-1})W_{n-1}\}\cdots\{P(\Omega_0-\Omega_1)W_1\}I_0$$

式中，I_n 是经过 n 次碰撞后在方向角 Ω 到达接收器 R 的某个光子的 Stokes 矢量；P 是散射的相矩阵；W 是方差减小技术中的偏差函数的统计权重矩阵。

(2) 到达接收器的透射波的 Stokes 矢量的估计函数为：

$$I(\Omega,R)=\frac{1}{k}\sum_k\sum_n I_{k,n}(\Omega,R)$$

式中，k 为光子数；n 为散射事件发生的次数；Ω 为透射方向；R 为接收器位置；$I_{k,n}$ 为第 k 个光子经过 n 次散射后的透射强度。

(3) 在方位角 Ω、q 极化方向的有效衰减系数 κ_q 可用下式计算：

$$\kappa_q(\Omega)=\frac{\ln\dfrac{I_{0q}(\Omega)}{I_q(\Omega,R)}}{d}$$

式中，I_{0q} 和 I_q 分别是 q 极化方向上的入射强度和透射强度；d 是传输距离。

辐射灰度纠正模型

李加洪、朱振海：机载短波红外分光谱扫描数据进行油气勘查的模式识别研究．环境遥感，1995，10(3)

$$\Delta G_i=KG_0\left[1/(\cos(i\varphi))-1\right]$$

式中，ΔG_i 为采样后第 i 个像元的辐射灰度的追加值；φ 为瞬时视场角；G_0 为统计的机下点的像元灰度值；$\left[1/(\cos(i\varphi))-1\right]$ 为第 i 个像元程辐射路径的变化率；K 为调整系数。

调频三角波的频率模型

孙波、朱素云：一种小型便携式高智能地面散射计系统——LS-X4 陆基雷达散射计．环境遥感，1995，10(3)

$$f_m=\frac{C\cdot f_i}{4\cdot\Delta f\cdot R}$$

式中，f_i 为中频频率；$R=H/\cos\theta$、θ 为入射角；C 为电磁波传播速度。

自然光辐射各分量卫星遥感图像的计算机生成原理与方法的数学模型

李先华、兰立波等：自然光辐射各分量卫星遥感图像的计算机生成原理与方法．环境遥感，1995，10(3)

1. 卫星遥感数据中的散射辐射分量及其遥感图像

(1) 卫星像片阴影中像元的散射辐射遥感分量 D_{Dij} 模型：

$$D_{Dij}=DN_{ij}-D_{Aij}-D_{Rij}$$

式中，DN_{ij}，D_{Aij} 和 D_{Rij} 分别为像元 P_{ij} 原始遥感值、大气辐射遥感值和地表邻坡辐射遥感值。

(2) 地面水平时阴影像元的地表散射辐射值及其遥感分量模型：

$$D'_{Dij} = \frac{D_{Dij}}{G_{ij}}$$

$$E'_{Dij} = \pi \cdot \left(D'_{Dij}/K\right) \cdot \gamma_{ij} \cdot \tau_{ij}$$

式中，D'_{Dij} 为地面水平时卫星像片阴影中像元散射辐射遥感值；G_{ij} 为阴影中像元的天空光照射率；E'_{Dij} 为该阴影像元地面水平时的天空散射辐照度；K 为转换系数；γ_{ij} 和 τ_{ij} 分别为该像元的地面反射率和大气光谱透射率。

2. 遥感数据中的直接辐射分量及其数字图像的生成

(1) 任意非阴影像元的直射辐射遥感分量 D_{SKL} 模型：

自然地表：$D_{SKL} = DN_{KL} - D_{AKL} - D_{RKL} - D_{DKL}$

水平地表：$D'_{SKL} = D_{SKL}/F_{KL}$

式中，F_{KL} 为像元直射光地形改正系数。

(2) 阴影像元的"直射辐射遥感"分量 D_{Sij} 模型：

$$D_{Sij} = D_{Dij} \cdot \left(F_{ij}/L_{ij}\right) \cdot G_{ij}$$

式中，L_{ij} 为当像元地面水平时地面散射与直射光照度之比。

3. 直、散射遥感图像的处理

(1) 散射辐射遥感图像灰度的线性拉伸模型：

$$d_{Dij} = \left(D_{Dij} - \min D_{SKL}\right) \cdot \frac{\left(2^N - 1\right)}{\left(\max D_{DKL} - \min D_{DKL}\right)}$$

$$K = 1, 2, \cdots, n; L = 1, 2, \cdots, m$$

其中，d_{Dij} 为线性拉伸后像元 P_{ij} 的灰度值；N 为数据量化比特数；m 和 n 分别为该图像纵、横像元数。

(2) 直射辐射遥感图像灰度的线性拉伸模型：

$$d_{Sij} = \left(D_{Sij} - \min D_{SKL}\right) \cdot \frac{\left(2^N - 1\right)}{\left(\max D_{SKL} - \min D_{SKL}\right)}$$

$$K = 1, 2, \cdots, n; L = 1, 2, \cdots, m$$

中分辨率机载海洋雷达高度计系统分析及接收系统的研制模型

张升伟，张俊荣，郭伟：中分辨率机载海洋雷达高度计系统分析及接收系统的研制．环境遥感，1995，10(3)

1. 系统分析

(1) 雷达高度计平均功率回波波形 $W(t)$ 模型：

$$W(t) = P(t)Q(t)S(t)$$

式中，$P(t)$ 为平坦海面的冲激响应；$Q(t)$ 为海洋表面散射元的高度概率密度函数；$S(t)$ 为雷达系统点目标的响应。

(2) 高度噪声 σ_h 模型：

$$\sigma_h = 0.8\sqrt{\frac{\left(N_g\sigma_T\right)^2 + \sigma_s^2}{N_g N}\left(1 + \frac{1}{SNR}\right)}$$

式中，$\sigma_T = 0.426c\tau/2$，为系统点目标分辨率；σ_s 为均方值波高；N_g 为形成跟踪门的数目；N 为独立测量数。

2. 接收机研制

(1) 经"全去斜坡"处理后的频率差异 Δf 模型：

$$\Delta f = \frac{B}{T} \cdot \Delta t$$

(2) 回波的跟踪模型：

$$h_n = h_{n-1} + \alpha\Delta h_{n-1} + \dot{h}\Delta t$$

$$\dot{h} = \dot{h}_{n-1} + \beta \cdot \Delta h_{n-1}/\Delta t$$

式中，h 为高度估算；$\dot{h}$ 为高度变化率；Δt 为跟踪器周期；α 为高度变化值的系数；β 为高度变化率的系数。

土壤水分和植被生物量的获取模型

Wigneron J P, Chanzy A, Calvet J et al：利用对农作物野外被动微波测量数据获取土壤水分和植被生物量．Remote Sensing of Environment, 1995，51

(1) 获取方法：

$$m_v(5\,\text{GHz}) = (-2.9041M^2 + 1.7723M + 0.7491) \cdot M$$

式中，$M = m_v(1.4\,\text{GHz})$；$m_v(5\,\text{GHz})$ 和 $m_v(1.4\,\text{GHz})$ 分别是对发射的 5 和 1.4GHz 的被动微波有贡献的土壤表层水分含量。

(2) 对 H 极化方向的光学厚度 τ 的获取：

$$\tau_h(1.4\text{GHz}) = r_{tau} \cdot \tau_h(5\text{GHz})$$

式中，r_{tau} 是参数。

(3) V 极化方向的光学厚度可从 H 极化方向的光学厚度得到：

$$\tau_v(1.4\text{GHz}) = (\cos^2\theta + C_{pol}(1.4\text{GHz})\sin^2\theta)\cdot\tau_h(1.4\text{GHz})$$

$$\tau_v(5\text{GHz}) = (\cos^2\theta + C_{pol}(5\text{GHz})\sin^2\theta)\cdot\tau_h(5\text{GHz})$$

式中，C_{pol} 是极化校正因子。

一个新的冠层反射模型

Kuusk A：一个快速、可逆的冠层反射模型 Remote Sensing of Environment, 1995, 51

(1) 直接日照辐射的单散射已经从漫散通量中分离出来：

$$\rho = (S'_\lambda / Q_\lambda)\rho^1 + \rho_D$$

式中，ρ 是冠层半球方向上的反射因子；ρ^1 是双向反射因子中的单散射成分；ρ_D 是半球方向反射因子中的共同成分；S'_λ 和 Q_λ 分别是在植被冠层水平面上的直接日照辐射和总辐射量。

(2) 向下和向上的漫射通量 E_+ 和 E_- 分别表示为：

$$E_+(z) = A\exp(-mz) + B\exp(mz) + CE_s(0)\exp(-k_1 z)$$

$$E_-(z) = Ah\exp(-mz) + Bh^{-1}\exp(mz) + DE_s(0)\exp(-k_1 z)$$

(3) 在方向 r_2 上与漫射通量相关的辐射通量是：

$$E_{0,D}(z) = uE_+(z) + vE_-(z)$$

式中，z 是在冠层中的深度；z=0 表示在冠层的上边界；z=H 即为地面；E_s 是直接日照通量；A, B, C, D, m 和 k 是系数。

(4) SAIL 系数 k_i $(i = 1,2)$ 可以通过 Ross-Nilson G-函数来表示：

$$k_i = G_L^{(i)} L_H / \mu_i$$

式中，$\mu_i = \cos\theta_i$、θ_i 是极角；L_H 是叶面积指数。

(5) Ross-Nilson G-函数定义为

$$G_L^{(i)} = G_L(\mu_i) = (1/2\pi)\int_{2\pi} g_L(r_L)|r_L \cdot r_i| dr_L$$

式中，r_L 是叶片的法向矢量；r_i 是在(θ_i, φ_i)方向的单位矢量；$\mu_L = \cos\theta_L$。

从卫星观测获取地表长波通量的数学模型

Ellingson R G：从卫星观测获取地表长波通量的一个评论性回顾 Remote Sensing of Environment, 1995, 51

(1) 大气顶部的辐射度 N：

$$N_i(\mu) = \int_{\Delta\upsilon_i} I(z_t;\mu)\varphi_\upsilon d\upsilon$$

式中 z_t 表示大气的顶部；$I(z_t;\mu)$ 是特定的强度；i 表示谱段；φ_υ 是对给定谱段的仪器反应函数；υ 是频率或波数；μ 是当地天顶角的余弦值。

(2) 一个测量集合的平均值可表示为：

$$N_i = (1 - A)N_{0i} + AN_{ci}$$

式中，N_{0i} 表示水平方向均匀、完全无云时的辐射度；N_{ci} 表示水平方向均匀、完全云遮盖时的辐射度；A 表示在高度 z_{ct} 处一层无限薄的、非散射的、随机分布的黑云的有效百分比。

(3) 非散射局域热力学平衡条件下无云和有云分别对应的强度 $I_{\upsilon 0}$ 和 $I_{\upsilon c}$ 可表示为：

$$I_{v0}(z_t;\mu) = B_v^*(0)T_v(z_t,0;\mu) + \int_0^{z_t} B_v(z')\frac{\partial T_v(z_t,z';\mu)}{\partial z'}dz'$$

$$I_{vc}(z_t;\mu) = B_v(z_{ct})T_v(z_t,z_{ct};\mu) + \int_{z_{ct}}^{z_t} B_v(z')\frac{\partial T_v(z_t,z';\mu)}{\partial z'}dz'$$

式中，$B_v^*(0)$ 是表面温度的普朗克函数；$B_v(z')$ 是在高度 z' 处的普朗克函数；单色透射率 $T_v(z_c,z';\mu) = e^{-\tau_v(z')\mu}$，$\tau_v$ 是非云吸收者的光学厚度。

(4) 表面处向下的通量可表示为无云时和有云时的体积通量 F_0 和 F_c 的函数：

$$D_{LR} = (1 - A^*)F_0 + A^*F_c$$

式中，A^* 是底部在高度 z_{cb} 相对向下通量的云的有效百分比。

(5) 有云时和无云时向下的通量与有云时和无云时下降的具体强度之间的关系为：

$$F = 2\pi\int_0^\infty dv\int_0^1 I_v(0;-\mu)d\mu$$

式中，F 为强度，它与温度、吸收的气体及同一清晰度的云层有关。

无云时下标记为 0，有云时下标记为 c，条件如下：

$$I_{v0}(0;-\mu)=-\int_0^z B_v(z')\frac{\partial T_v(0,z';-\mu)}{\partial z'}dz'$$

$$I_{vc}(0;-\mu)=B_v(z_{cb})T_v(0,z_{cb};-\mu)-\int_{z_{cb}}^{z} B_v(z')\frac{\partial T_v(0,z';-\mu)}{\partial z'}dz'$$

式中，$T(0,z';-\mu)=e^{-(\tau_v'-\tau_v)/\mu}$；$\tau_v^*$ 空气中单色光的透射强度。

卫星获取表面短波辐射的数学模型

Pinker R T, Frouin R, Li Z：卫星获取表面短波辐射的方法回顾. Remote Sensing of Environment, 1995, 51

(1) Staylor 求 D_{SSR} 的方法：

$$D_{SSR}=D_{SSR_{TOA}}T_A T_C$$

式中，D_{SSR} 是下行表面短波辐射；$D_{SSR\,TOA}$ 是在大气层顶部的 D_{SSR}；T_A 是晴朗天空下的大气透射率；T_C 是云层的透射率。

T_C 基于一个阈值方法确定：

$$T_C=0.05+0.95(R_{ovc}-R_{meas})/(R_{ovc}-R_{clr})$$

式中，R_{ovc} 和 R_{clr} 分别表示每月从每个 C1 箱子(250 × 250km)得到的大气层顶部的反射率的极端值；R_{meas} 是从每 3 小时一次的测量值得到的大气层顶部的反射率。

(2) Pinker 和 Laszlo 求 D_{SSR} 的方法：

$$D_{SSR_{all}}=\frac{n_{clear}D_{SSR\,clear}+n_{cloudy}D_{SSR\,cloudy}}{n_{clear}+n_{cloudy}}$$

式中，$D_{SSR\,all}$ 所有条件下天空的 D_{SSR} 流量；$D_{SSR\,clear}$ 和 $D_{SSR\,cloudy}$ 分别是晴朗天空及云层条件的流量；n_{clear} 和 n_{cloudy} 分别表示无云及有云的像素数目。

(3) 净表面短波辐射(N_{SSR})：

$$N_{SSR}=D_{SSR}(1-A_s)$$

式中，A_s 是表面漫反射系数。

地球表面有效光合作用辐射的估测模型

Frouin R, Pinker R T：通过卫星观测估计地球表面有效光合作用辐射. Remote Sensing of Environment, 1995, 51

有效光合作用辐射(PAR)传统上定义为：

$$\mathrm{PAR}(\mathrm{W\,m^{-2}})=\int_{0.4}^{0.7}I(\lambda)d\lambda$$

式中，$I(\lambda)$ 是向下的波长为 λ 的日照辐射。

由于光过程是量子反应，因此下面方程更为有用：

$$\mathrm{PAR}(\mathrm{quantum\,m^{-2}\,s^{-1}})=\frac{1}{hc}\int_{0.4}^{0.7}\lambda I(\lambda)d\lambda$$

式中，h 是普朗克常数；c 是真空中的光速。

辐射传输方程

蒋君，荀毓龙：卫星遥感大气的层析扫描反演方法. 环境遥感，1996，11(1)

$$R(\nu,\theta)=B(\nu,T_s)\tau(\nu,\theta,P_s)+\int_{P_0}^{P_S}B[\nu,T(P)]\cdot\left[-\frac{d\tau(\nu,\theta,P)}{dP}\right]\cdot dP$$

式中，$R(\nu,\theta)$ 为辐射度；B 为温度 T、波数 ν 时的普朗克函数；τ 为压强 P 到观测器处 P_0 之间的大气透过率；θ 为天顶角；T_S, P_S 分别为地表温度和压强。

数值模拟结果——σ-e 相关关系模型

金亚秋，黄兴忠：微波主被动遥感相关特性的数值模拟和实验对比. 环境遥感，1996，11(1)

$$\sigma_{hh}(\theta)=2\pi^2\varphi_\xi(0)k_0^4\left|\frac{X_{01}}{D_2}\right|^2\times\left[\frac{1}{4k_{1z}''}\left(1-e^{-4k_{1z}''d}\right)\left(1+|R_{12}|^4e^{-4k_{1z}''d}\right)+4d|R_{12}|^2e^{-4k_{1z}''d}\right]$$

$$e_h(\theta)=\frac{k_0\varepsilon_g''}{\cos\theta\varepsilon_0}\frac{1}{2k_{1z}''}\times\left[\left|\frac{X_{01}}{D_2}\right|^2\left(1-e^{-2k_{1z}''d}\right)\left(1+|R_{12}|^2e^{-2k_{1z}''d}\right)\right]+\frac{k_0\varepsilon_2''}{\cos\theta\varepsilon_0}\frac{1}{2k_{2z}''}\left|\frac{X_{01}X_{12}}{D_2}\right|^2e^{-2k_{1z}''d}$$

式中，$\sigma_{hh}(\theta)$ 为一阶后向散射系数；$e_h(\theta)$ 为一层具平坦截面的随机介质的热发射率。

成像光谱图像处理中的光谱吸收指数及吸收鉴别模型

王晋年，郑兰芬，童庆禧：成像光谱图像光谱吸收鉴别模型与矿

物填图研究. 环境遥感，1996，11(1)

(1) 成像光谱图像处理中的光谱吸收指数 SVI' 模型：

$$SVI' = d \cdot \varepsilon_{S1} \cdot \frac{\rho_{S1}}{\rho_m} + (1-d) \cdot \varepsilon_{S2} \cdot \frac{\rho_{S2}}{\rho_m}$$

式中， $\varepsilon_{S1} = \frac{\sum_{j=1}^{n} DN_{S1,j}}{\sum_{j=1}^{n} DN_{m,j}}$ ； $\varepsilon_{S2} = \frac{\sum_{j=1}^{n} DN_{S2,j}}{\sum_{j=1}^{n} DN_{m,j}}$ ；

$d = \frac{\lambda_{S2} - \lambda_m}{W}$，为吸收的对称性参数； $DN_i = \pi^{-1} a_i E_i T \tau_i C_i \rho_i$；$W = \lambda_{S2} - \lambda_{S1}$，为吸收波段宽度；$\rho_{S1}$ 和 λ_{S1} 分别为吸收左肩端 $S1$ 的反射率和波长位置；ρ_m 和 λ_m 分别为吸收点 M 的反射率和波长位置； ρ_{S2} 和 λ_{S2} 分别为吸收右肩端 $S2$ 的反射率和波长位置；a 为放大系数；C 为传感器的光谱响应；E 为目标的辐照率；τ 为大气的透过率；ρ 为反射率；T 为地形因子。

(2) 成像光谱图像光谱吸收鉴别 $SAI''(\lambda)$ 模型：

$$S_{AI}''(\lambda) = \arctan\left[\frac{\frac{d}{\varepsilon_{S1}}(DN_{S1} - \beta_{S1}) + \frac{1-d}{\varepsilon_{S2}}(DN_{S2} - \rho_{S2})}{DN_m - \beta_m}\right]$$

式中，$\beta_i = \pi^{-1} a_i \int_{\Delta\lambda_i} L_P(\lambda) C(\lambda) d(\lambda)$；$DN_{S1}$、$DN_{S2}$ 和 DN_m 分别为吸收肩端图像与吸收图像的灰度值；$\Delta\lambda_i$ 为波段 I 的光谱采样间隔；$L_P(\lambda)$ 为大气辐射；b 为"暗电流"值；β_i 值包含程辐射和成像光谱仪光谱响应、放大增益等信息。

水汽透过率及其密度计算

宋乐方，魏合理，吴晓庆：大气水汽的红外遥感．环境遥感，1996，11(2)

(1) 水汽透过率 ζ 模型：

$$\zeta = \frac{V(\lambda_{on}) V_0(\lambda_{off})}{V_0(\lambda_{on}) V(\lambda_{off})}$$

(2) 标准状况下水汽密度 w_0 模型：

$$w_0 = \left(\frac{P}{P_0}\right)\left(\frac{T_0}{T + T_0}\right) w$$

BRDF 模型

胡宝新，李小文，朱重光：一种大气订正的方法：BRDF——大气订正环．环境遥感，1996，11(2)

$$\rho_i = f_0 + f_1 k_{geo} + f_2 k_{vol}$$

式中，ρ_i 为地物的 BRDF；k_{geo} 和 k_{vol} 分别为地表散射核和体散射核；f_1 和 f_2 为它们响应的数值；f_0 为各向同性散射的贡献。

薄云成像模型

赵忠明，朱重光：遥感图像中薄云的去除方法．环境遥感，1996，11(3)

(1) 一般模型：

$$S(x,y) = aLr(x,y)t(x,y) + L[1 - t(x,y)]$$

式中，$S(x,y)$ 为扫描仪接收到的图像；$r(x,y)$ 为地面景物反射率，代表信号；$t(x,y)$ 为云层的透射率，代表噪声；L 为太阳光强度；a 为太阳光在大气传输过程中的衰减系数。

(2) 简化模型：

$$S(x,y) = i(x,y) \cdot r(x,y)$$

式中，$i(x,y)$ 为地面的反射完全相同，且为全反射时，扫描仪上得到的图像。

热象仪测量原理

支毅乔，崔承禹，张晋开等：红外热象仪在岩石力学遥感基础实验中的应用．环境遥感，1996，11(3)

(1) 带有温度参考源的测量模型：

$$T_o = \frac{\Delta i_{or}}{\tau\varepsilon_o} + \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_o} \cdot T_r + \left(1 - \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_o}\right) \cdot T_a$$

$$\varepsilon_o = \frac{\Delta i_{or} + \tau\varepsilon_r(T_r - T_a)}{\tau(T_o - T_a)}$$

(2) 没有温度参考源的测量模型：

$$T_o = \frac{L + i_o}{\tau\varepsilon_o} + \left(1 + \frac{1}{\varepsilon_o}\right) \cdot T_a$$

$$\varepsilon_o = \frac{L + i_o - \tau T_a}{\tau(T_o - T_a)}$$

式中，T_o 为目标温度；ε_o 为目标辐射系数；T_r 为参考源温度；ε_r 为参考源辐射系数；T_a 为环境温度；Δi_{or} 为所观测的目标和参考源温度的热图像之间的图像等温差；i_o 为目标热象等温值；L 为温度级设置；τ 为大气校正系数。

生物量密度-反射散射关系模型

Luckman A, Baker J, Kuplich T M et al：热带再生森林生物量与卫星 SAR 观测的雷达反向散射间的关系 Remote Sensing of Envir-

onment, 1997, 60

$$\sigma^{o} = a\cdot(1 - e^{-(B/b)^{c}})$$

式中，σ^{o} 为校准的标准反射散射密度；B 为地面上生物量密度；a, b 和 c 为自由参数。

空间波与长试样法测量介电常数的模型

陈志雨，李安莫，周冬青：空间波与长试样法测量介电常数的结果与对照. 遥感学报，1997，1(1)

(1) 散射电场 $\boldsymbol{E}^{S}(P)$ 模型：

$$E^{S}(P) = \frac{j\omega\mu e^{jk_0 R_0}}{4\pi R_0}\int\left[\left(\hat{n}\times \boldsymbol{H}^{T}\right) - \hat{K}_0^{S}\cdot\left(\hat{n}\times \boldsymbol{H}^{T}\right)\hat{K}_0^{S} - \frac{1}{\eta}\left(\hat{n}\times \boldsymbol{E}^{T}\right)\hat{K}_0^{S}\right]e^{jk_0\hat{K}_0^{S}\cdot r'}\mathrm{d}S'$$

式中，$\boldsymbol{H}^{T}$ 和 $\boldsymbol{E}^{T}$ 为散射面元处的总场；$\hat{n}=\hat{z}$；对于镜面反射，$\hat{K}_0^{S} = -\sin\theta_0\hat{x} + \cos\theta_0\hat{z}$。

(2) 长试样法——介质介电常数 ε_r 模型：

$$\varepsilon_r = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2 + \left[1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2\right]\left(\frac{\rho - j\tan\dfrac{2\pi\bar{D}}{\lambda_g}}{1 - j\rho\tan\dfrac{2\pi\bar{D}}{\lambda_g}}\right)^2$$

式中，λ_0、λ_g 和 λ_c 分别为自由空间波长、波导波长和临界波长；ρ 为驻波系数；$\bar{D}$ 为第一个驻波最小点到试样输入端面的距离，它由与金属短路板比较测出。

太阳直射辐射模型

邱金桓：大气气溶胶光学厚度的宽带消光遥感方法及其应用. 遥感学报，1997，1(1)

$$S = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda)e^{-\tau_a(\lambda)/\mu_0}T_m(\lambda,\mu_0)\mathrm{d}\lambda$$

式中，$S_0(\lambda)$ 为大气上界 λ 波长太阳强度；$\tau_a(\lambda)$ 为 λ 波长大气气溶胶光学厚度；μ_0 为太阳天顶角余弦；λ_1 和 λ_2 分别为太阳光谱的上限和下限；T_m 为分子的透过率函数。

湿地植被成像光谱的分析模型

童庆禧，郑兰芬，王晋年等：湿地植被成像光谱遥感研究. 遥感学报，1997，1(1)

1. 表观反射率图像获取

辐射能量 $L(\lambda)$ 模型：

$$L(\lambda) = Lp(\lambda) + Lg(\lambda)\cdot T(\lambda)$$

式中，$Lp(\lambda)$ 为程辐射；$Lg(\lambda)$ 为地面反射辐射能量值；$T(\lambda)$ 为大气透过率。

2. 导数光谱波形分析

(1) 植被覆盖反射率 ρ 模型：

$$\rho = \left(1 - e^{-2cI_a}\right)\rho_v + e^{-2cI_a}\rho_s$$

式中，I_a 为叶面积指数；$c^2 = k^2 - \beta^2$，β 为散射系数，k 为吸收系数；ρ_v 为植被反射率；ρ_s 为土壤反射率。

(2) 透过率 θ 模型：

$$\theta = (1-k)e^{-k} - k^2\int_k^{\infty} x^{-1}e^{-x}\mathrm{d}x$$

式中，k 为植物光谱吸收系数，是波长的函数。

3. 导数光谱波形的生物量分析

植物生物量 M_T 模型：

$$M_T = -(2c)^{-1}(Lr)^{-1}(L_{SA})^{-1}\ln(1-\Phi)$$

式中，Lr 为叶生物量占全部生物量的比例；L_{SA} 为特定叶面积指数；Φ 为归一化植被因子。

干涉雷达成像原理和处理方法

王超：利用航天飞机成像雷达干涉数据提取数字高程模型. 遥感学报，1997，1(1)

(1) 干涉雷达相位差 φ 与信号路径差 Δr 的关系模型：

$$\varphi = 4\pi f/c\cdot\Delta r$$

式中，λ 为雷达信号波长；f 为频率；c 为光速。

(2) 相位解缠算法：

离散泊松方程：

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}\varphi(x,y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\varphi(x,y) = \rho(x,y)$$

能量平衡方程的化简及热惯量求解模型

余涛，田国良：热惯量法在监测土壤表层水分变化中的研究. 遥感学报，1997，1(1)

(1) 土壤热传导方程：

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

式中，ρ 为土壤比重；c 为土壤比热；T 为土壤温度；t 为时间；z 为土层深度；λ 为土壤传导热。

(2) 大气-土壤界面处的能量平衡模型：

$$R_s + R_L - R_e = G + H + LE$$

式中，R_s 为太阳短波辐射通量；R_L 为大气向下的长波辐射通量；R_e 为土壤向上的长波辐射通量；G 为土壤表层热通量；H 为土壤表层显热通量；LE 为土壤表层潜热通量。

(3) 土壤表层热惯量模型：

$$P = \frac{-\sqrt{2}\omega B + \sqrt{2\omega^2 B^2 - 4\omega(B^2 - C^2)}}{2\omega}$$

式中，ω 为圆频率；B 为综合因子。

卫星传感器接收的地表亮温模型

曹梅盛，张铁钧：青海高原春秋地表土冻融的微波遥感监测．遥感学报，1997，1(2)

$$T_b = eT_0 + (1-e)T_{sky}$$

式中，e 与 T_0 分别为地表上比辐射率和温度；T_{sky} 为天空视在温度。

大气交叉辐射影响模型

牛铮，朱重光，王长耀：斜视角度下大气交叉辐射影像分析．遥感学报，1997，1(2)

$L_s(\boldsymbol{\Omega}_s, \boldsymbol{\Omega}_0)$和$L_s(\boldsymbol{\Omega}_d, \boldsymbol{\Omega}_0)$ 综合影响的 $a(x,y)$ 模型：

$$a(x,y) = \frac{\rho(\boldsymbol{\Omega}_s, \boldsymbol{\Omega}_0) - \dfrac{L_0(\boldsymbol{\Omega}_s, \boldsymbol{\Omega}_0)}{\mu_0 F_0}}{e^{-\tau\left(\frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu_s}\right)}}$$

$$\rho(\boldsymbol{\Omega}_s, \boldsymbol{\Omega}_0) = \frac{L(\boldsymbol{\Omega}_s, \boldsymbol{\Omega}_0)}{\mu_0 F_0}$$

$$L(\boldsymbol{\Omega}_s, \boldsymbol{\Omega}_0) = L_s(\boldsymbol{\Omega}_s, \boldsymbol{\Omega}_0) + L_0(\boldsymbol{\Omega}_s, \boldsymbol{\Omega}_0) + L_d(\boldsymbol{\Omega}_s, \boldsymbol{\Omega}_0)$$

式中，$\rho(\boldsymbol{\Omega}_s, \boldsymbol{\Omega}_0)$ 为含有大气影响的多角度遥感图像反射率；$L(\boldsymbol{\Omega}_s, \boldsymbol{\Omega}_0)$ 为传感器接收的辐射亮度；$L_s(\boldsymbol{\Omega}_s, \boldsymbol{\Omega}_0)$ 为经过大气衰减的来自被观测地物的辐射；$L_0(\boldsymbol{\Omega}_s, \boldsymbol{\Omega}_0)$ 为被大气直接反射的程辐射；$L_d(\boldsymbol{\Omega}_s, \boldsymbol{\Omega}_0)$ 为来自背景地物的交叉辐射；$\boldsymbol{\Omega}_s$ 和 $\boldsymbol{\Omega}_0$ 分别为太阳照射和传感器接收的方向；$\mu_0 F_0$ 为大气上界的太阳辐射通量；μ_0, μ_s 分别为太阳和传感器方向天顶角的余弦。

高度计系统分析与分裂门跟踪及全程搜索模型

许可，于志强，李茂堂等：中分辨率机载海洋雷达高度计信号处理方法及其实现．遥感学报，1997，1(2)

(1) 雷达高度计平均回波信号模型：

$$P_r(t) = P_{FS}(t) \cdot Q(t) \cdot P_{PT}(t)$$

式中，$P_r(t)$为接收回波的平均功率；$P_{FS}(t)$为平均的平坦表面的冲激响应；$Q(t)$为反射点的高度概率密度函数；$P_{PT}(t)$ 为雷达系统点目标的冲激响应。

(2) $\alpha - \beta$ 滤波器的 Z 域闭环传输函数$H(Z)$模型：

$$H(Z) = \frac{(\alpha+\beta) - \alpha Z^{-1}}{(1+\alpha+\beta) - (2+\alpha)Z^{-1} + Z^{-2}}$$

式中，α 为高度平滑系数；β 为速度平滑系数。

海洋雷达高度计测高原理及关键技术

阎敬文，孙晖，张俊荣等：机载海洋雷达高度计的性能分析．遥感学报 1997，1(2)

(1) 雷达高度计回波能量 $w(t)$ 模型：

$$w(t) = p(t)q(t)s(t)$$

式中，$p(t)$为平坦海面的冲激响应；$q(t)$为海面散射单元的高度密度系数；$s(t)$为雷达系统对点目标的响应。

(2) 经全去斜坡混频器的差频输出信号 $S_i(t)$模型：

$$S_1(t) = \bar{A}\,\mathrm{rect}\left(\frac{t+\Delta t}{T}\right)\mathrm{rect}\frac{t}{T} \times$$

$$\cos\left[(\omega_i - 2\pi k\Delta t)\ \ t - \pi k(\Delta t)^2 - \omega_i \Delta t\right]$$

$$\mathrm{rect}\left(\frac{t+\Delta t}{T}\right)\mathrm{rect}\frac{t}{T} = \begin{cases} 1 & (-T/2 < t < T/2) \\ 0 & (-T/2 > t, t > T/2) \end{cases}$$

大气地表辐射传输模型

金亚秋：星载微波 SSM/I 对中国西北沙漠地区遥感数据的辐射特征分析．遥感学报，1997，1(3)

$$T_{Bp}(\theta) = e_{sp}T_S e^{-\tau_a}(1 - e^{-\tau_a})(1 + r_{sp}e^{-\tau_a})T_{a,p,q} = V, H$$

式中，e_{sp} 为地面 p^- 极化热发射率；r_{sp} 为地面极化反射率，且有 $r_{sp}=1-e_{sp}$；T_S 和 T_a 分别为地表物理温度和大气有效物理温度；τ_a 为大气不透明度。

辐射传输及大气光学参量测量模型

阎祥军，朱永豪，田庆久等：MAIS 成像光谱仪飞行定标和反射率反演．遥感学报，1997，1(3)

(1) 辐射传输模型：

$$L_s(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v, \lambda) = \frac{\rho(\lambda)}{\pi}\left[E_0(\lambda)\cos(\theta_s)T_d(\theta_s, \lambda) + E_d(\theta_v, \varphi_s, \lambda)\right] \cdot T_u(h, \theta_v, \lambda) + L_p(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v, \lambda)$$

式中，$L_S(\theta_S,\varphi_S,\theta_v,\varphi_v,\lambda)$ 为传感器入瞳处光谱辐射度；E_0 为大气顶太阳辐照度；E_d 为目标表面天空漫射辐照度；T_d 为太阳与目标之间大气路径透过率；T_u 为传感器与目标之间大气路径透过率；L_P 为大气路径辐射度；φ_S 和 φ_v 分别为太阳和观测方位角；λ 为波长；ρ 为地面目标反射率。

(2) 大气光学参量测量——Langley 模型：

$$\ln(V)+\ln(\sec\theta_S)=\ln\left(V_0/R^2\right)-\tau\cdot m$$

式中，V 为辐射计输出电压；θ_S 为太阳天顶角；R 为日-地距离；V_0 为对应 0 大气质量相应值。

INSAR 干涉图的相位误差的概率密度函数

唐健、王贞松：干涉 SAR 的二维相位展开算法研究．遥感学报，1997，1(3)

$$f(\Delta\varphi)=\frac{(1-P^2)}{2\pi}\cdot\left[\frac{\pi\rho}{2}+\sqrt{1-\rho^2}+\rho\cdot\arctan\left(\frac{\rho}{\sqrt{1-\rho^2}}\right)\right]\cdot(1-\rho^2)^{-3/2}$$

$$\rho=P\cos(\Delta\varphi)=P\cos(\varphi_1-\varphi_2-\beta)$$

$$P=\frac{\langle u_1u_2^*\rangle}{\sqrt{\langle u_1u_1^*\rangle\langle u_2u_2^*\rangle}}$$

式中，P 为两复数图像的相关系数；β 为真实的干涉相位差；$\varphi_1-\varphi_2$ 为单视图的干涉相位差。

后向散射模型

王新中、姜景山：旋转扫描散射计海面风场检测仿真研究．遥感学报，1997，1(3)

$$\sigma^0=\frac{1}{4}\left(\sigma_u^0+2\sigma_c^0+\sigma_d^0\right)+\frac{1}{2}\left(\sigma_u^0-\sigma_d^0\right)\cos\varphi+\frac{1}{4}\left(\sigma_u^0-2\sigma_c^0+\sigma_d^0\right)\cos(2\varphi)$$

式中，σ^0 为散射系数；φ 为水平面风向；σ_u^0、σ_c^0 和 σ_d^0 分别为上行、交叉和下行风的散射系数。

太阳光变角入射时辐射计热力学微分方程

方伟，禹秉熙：极轨道卫星上测量太阳常数的新方法．遥感学报 1997，1(4)

(1) 微分方程模型：

$$\begin{cases}C(\mathrm{d}\Delta T/\mathrm{d}t)+K\Delta T=P_0\cos(\omega t-7.5^\circ)\\ \Delta T=0,\ t=0\end{cases}$$

(2) 方程解的模型：

$$\Delta T\approx\frac{P_0}{K}\left[\cos(\omega t-7.5^\circ)-\cos 7.5^\circ e^{-\frac{t}{\tau}}\right]$$

式中，C 为主腔的热容量；K 为主腔间热沉及环境的热传导系数；$\tau=C/K$ 为辐射计的时间常数。

双向反射分布函数模型

何积泰，陆亦怀：敦煌辐射校正场方向反射特性测量与评价．遥感学报 1997，1(4)

$$B_{\mathrm{RDF}}(\theta_S,\varphi_S,\theta_v,\varphi_v)=\frac{L(\theta_S,\varphi_S,\theta_v,\varphi_v)}{E(\theta_S,\varphi_S)}$$

式中，$E(\theta_S,\varphi_S)$ 为光源从 (θ_S,φ_S) 方向入射到目标表面上的辐照度；$L(\theta_S,\varphi_S,\theta_v,\varphi_v)$ 为目标表面受 (θ_S,φ_S) 方向入射的光照射时，沿 (θ_v,φ_v) 方向辐亮度。

真实蒸散量计算模型

Caselles V、Artigao M M、Hurtado E et al：融合 Landsat TM 与 NOAA-AVHRR 图像得到真实蒸散量图——在西班牙 Barrax 地区的应用．Remote Sensing of Environment，1998，63

(1) 对流热交换方程：

假设地面是完全覆盖的，根据对流热交换的单层模型得到：

$$ET_d-R_{nd}^*=B(T_a-T_s)_i$$

式中，ET 是真实蒸散量；R_n^* 是净辐射；T_a-T_s 是空气与植物表面的温度差；下标 d 和 i 分别表示白天值和日中瞬时值；B 是半经验系数。

$$B=\left(\frac{R_{nd}}{R_{ni}}\right)\left\langle\frac{\rho c_p}{L(r_a+r_0)}\right\rangle$$

式中，ρ 是空气密度；c_p 是空气定压热容量；r_a 和 r_0 分别是大气动力学和植物阻率；L 是潜热通量。

(2) 大气动力学阻率的公式为：

$$r_a=\frac{1}{k^2u}\left[\frac{\ln(z-h)}{z_0}\right]^2$$

式中，z 是气候测量的高度(3.75 m)；h 是植物高度；z_0 是粗糙参数；k 是 von Karman 常数；u 是白天平均风速。

(3) 植物阻率 r_0 的计算公式为：

$$r_o = r_{om}\left(\frac{I_{la}}{I_{la_m}}\right)$$

式中，r_{om} 对玉米和大麦分别为 25 s·m^{-1} 及 15 s·m^{-1}；I_{la} 是叶面积指数；I_{la_m} 是最大叶面积指数。

总的辐射计算公式

Gemmell F：对森林反射模型反演的地形影响研究　Remote Sensing of Environment，1998，65

照射到光学性质为朗伯的、海拔高度为 z 的倾斜地表的总辐射 $E(\lambda,z)$ 为：

$$E(\lambda,z)=\Theta\cdot E_{hd}(\lambda,z)\cdot\cos\theta_i/\cos\theta_s+$$
$$E_{hf}(\lambda,z)\cdot[k(\lambda,z)\cdot\cos\theta_i/\cos\theta_s+$$
$$(1-k(\lambda,z))\cdot V_d]+E_h(\lambda,z)\cdot V_t\cdot\rho_{adj}(\lambda)$$

式中，$E_{hd}(\lambda,z)$ 是水平的阳光照射地面上波长为 λ 的辐射中的直射成分；$E_{hf}(\lambda,z)$ 是水平地面上波长为 λ 的辐射中的漫射成分；$E_h(\lambda,z)$ 是水平的阳光照射地面上的总辐射；$k(\lambda,z)$ 是各向异性指数；V_d 是天空观察因子；V_t 是地形观察因子；$\rho_{adj}(\lambda)$ 是邻近地形的平均反射率；Θ 是控制投射阴影的二进制系数；θ_i 是太阳光线与地表法向的夹角；θ_s 是太阳天顶角。

地表温度与比辐射率的物理方程

柳钦火，徐希孺，陈家宜：遥测地表温度与比辐射率的迭代反演方法——理论推导与数值模拟。遥感学报，1998，2(1)

(1) 热红外辐射传输方程：

$$L_\lambda=B_\lambda(T_S)\varepsilon_{S\lambda}t_{0\lambda}+\left[1+(1-\varepsilon_{S\lambda})\tau_\lambda\right]L_{0\lambda}$$

$$L_{0\lambda}=\int_{t_{0\lambda}}^{1}B_\lambda(T_Z)\mathrm{d}t_\lambda$$

$$\tau_\lambda=\frac{t_{0\lambda}^2\int_{t_{0\lambda}}^{1}\frac{B_\lambda(T_Z)}{t_{Z\lambda}^2}\mathrm{d}t_\lambda}{\int_{t_{0\lambda}}^{1}B_\lambda(T_Z)\mathrm{d}t_\lambda}$$

式中，L_λ 为传感器所接收的波长为 λ 的热红外辐射能量；B_λ 为普朗克黑体辐射函数；T_S 为地表物理温度；T_Z 为高度 Z 处的大气温度；$\varepsilon_{S\lambda}$ 为波长 λ 的地表辐射率；$t_{0\lambda}$ 为整层大气的总透过率；$t_{Z\lambda}$ 为从高度 Z 到大气上界的透过率。

(2) 等效温度 $B_i(T_S)$ 和等效比辐射率 ε_{Si} 模型：

$$B_i(T_S)=\sum_n A_n\cdot B_i(T_n)$$

$$\varepsilon_{Si}=\frac{\int R(\lambda)\sum_n A_n\cdot B_i(T_n)\cdot\varepsilon_{in}\mathrm{d}\lambda}{\int R(\lambda)\sum_n A_n\cdot B_i(T_n)\mathrm{d}\lambda}$$

式中，A_n，T_n 和 ε_{in} 分别为混合像元中的 n 种地物所占面积百分比、表面温度和比辐射率。

地面目标反射率模型

田庆久，郑兰芬，童庆禧：SPOT 地面场定标与星上定标结果的比较分析．遥感学报，1998，2(3)

$$\rho(\lambda)=\left[\frac{\rho^*(\theta_S,\psi_S,\theta_v,\psi_{v,\lambda})}{T_g(\theta_S,\theta_{v,\lambda})}-\rho_a(\theta_S,\psi_S,\theta_v,\psi_{v,\lambda})\right]\times$$
$$\left[T(\theta_{S,\lambda})T(\theta_{v,\lambda})+S(\lambda)\left(\frac{\rho^*(\theta_S,\psi_S,\theta_v,\psi_{v,\lambda})}{T_g(\theta_S,\theta_{v,\lambda})}-\rho_a(\theta_S,\psi_S,\theta_v,\psi_{v,\lambda})\right)\right]^{-1}$$

式中，$\rho^*(\theta_S,\psi_S,\theta_v,\psi_{v,\lambda})$ 为地面-水平朗伯面的反射率；T_g 为太阳-地面-遥感器路径上大气的总透过率；ρ_a 为大气反射率；$T(\theta_S)$ 为向下散射透过率；$T(\theta_v)$ 为向上散射透过率；S 为大气反射比。

反演方程和数值模拟模型

张凌，杨硕文，刘锦丽等：一种反演雷达波束内不均匀反射率场的方法．遥感学报，1998，2(2)

(1) 球坐标系中雷达方程模型：

$$P(R,\bar\theta,\bar\varphi)=\frac{C_1}{R^4}\times$$
$$\int_R^{R+h/2}\int_{\bar\varphi-\delta\varphi}^{\bar\varphi+\delta\varphi}\int_{\bar\theta-\delta\theta}^{\bar\theta+\delta\theta}$$
$$[\eta(r,\theta,\varphi)\cdot\exp^{-2}\int_0^r\alpha(l,\theta,\varphi)\mathrm{d}l\times$$
$$G^2(\theta,\varphi,\bar\theta,\bar\varphi)r^2\sin\theta]\mathrm{d}\theta\mathrm{d}\varphi\mathrm{d}r$$

$$C_1=\frac{P_t\lambda^2}{64\pi^3}$$

式中，$P(R,\bar\theta,\bar\varphi)$ 为雷达接收到的从点 $(R,\bar\theta,\bar\varphi)$ 处的雷达分辨体积中反射回来的回波功率；P_t 为雷达的发射脉冲功率；λ 为雷达工作波长；$\eta(r,\theta,\varphi)$ 为点 (r,θ,φ) 处散射体的反射率；$\alpha(l,\theta,\varphi)$ 为点 (l,θ,φ) 处的微波强度衰减系数；h 为雷达发射脉冲的长度；$\delta\theta$和$\delta\varphi$ 分别

为θ和φ的有效积分区域。

(2) 增益函数$G_l(\theta-\overline{\theta}_S,\varphi-\overline{\varphi})$模型：

$$G_l(\theta-\overline{\theta}_S,\varphi-\overline{\varphi})=\frac{4\pi^2D^2}{\lambda^2}\cdot\frac{J_1^2(u)}{u^2}$$

$$u=\frac{\pi D}{\lambda}\sin\sqrt{(\theta-\overline{\theta}_S)^2+(\varphi-\overline{\varphi})^2}$$

式中，D为抛物面天线口径的直径；$J_1(u)$为第一类一阶贝赛尔函数。

频率响应及一维原形滤波器的设计模型

罗忠，赵忠明，朱重光：分形图形生成的一种新方法。遥感学报，1998，2(3)

(1) 频率响应$H_a(\omega)$模型：

$$H_a(\boldsymbol{\omega})=\alpha^M\left(\prod_{i=2}^{M}|\cos\theta_i|\right)^{-\beta}\|\boldsymbol{\omega}\|_2^{-M\beta}$$

$$\alpha=\left(\prod_{i=2}^{M}|\cos\theta_i|\right)^{\frac{\beta}{M}}$$

$$\beta=\frac{H+\frac{1}{2}}{M}$$

(2) z域滤波器$H_P(z_x,z_y)$模型：

$$H_P(z_x,z_y)=\frac{\sum_{i,j=0}^{P}c_{ij}z_x^{-i}z_y^{-j}}{\sum_{i,j=0}^{P}d_{ij}z_x^{-i}z_y^{-j}}$$

式中，c_{ij}和d_{ij}为滤波器系数。

机载激光扫描测距仪及其性能分析模型

江月松，李树楷：机载激光扫描测距仪的性能分析。遥感学报，1998，2(3)

(1) 激光脉冲信号功率P_R模型：

$$P_R=\frac{E_TA_R\eta(R)}{\tau R^2}T_OT_C^2T_A^2(r/\Omega)$$

式中，E_T为发射的激光能量；τ为激光脉冲宽度；A_R为接收器面积；R为激光器到目标表面的距离；T_O为光学系统透射率；T_C为云层的透射系数；T_A为双程大气溶胶透射率；$\eta(R)$为系统充满系数；r/Ω为目标的后向散射率。

(2) 噪声功率P_B模型：

$$P_B=I_SA_RT_A^2(r/\Omega)R_\varphi T_RF_B$$

式中，I_S为在1.047nm波长处大气引起的太阳光谱辐射；R_φ为接收器的视场角；T_R为接收系统的透射率；F_B为接收器的窄带通滤光片。

(3) 综合信噪比S_{NR}模型：

$$S_{NR}=\frac{P_R^2}{2q\left(P_BR_0+P_RR_0+i_d\right)^{FB}\frac{M^2}{R_0^2}+\frac{i_A^2}{(R_0M)^2}}$$

式中，M为Si APD的增益；F为Si APD的额外噪声因子；B为探测器带宽。

逆向辐射的机制及其对定标的影响模型

李靖，姜景山：微波辐射计的逆向辐射对定标及辐射测量的影响。遥感学报，1998，2(4)

(1) 微波辐射计的逆向辐射温度T_R模型：

$$T_R=\alpha_mYT_R'+\alpha_m(1-Y)T_0+(1-\alpha_m)T_a$$

式中，α_mYT_R'为由接收机净递送的噪声温度；$\alpha_m(1-Y)T_0$为有损网络S由于自发射所产生的净递送的噪声温度；$(1-\alpha_m)T_a$为天线或匹配负载产生的被反射回来的净递送的噪声温度。

(2) 天线接收到的亮度温度T_A模型：

$$T_A=T_C(1-\gamma)+\gamma T_R$$

式中，T_C为吸波材料的物理温度；γ为吸波材料及制冷剂平面的反射率；γT_R为逆向辐射温度带来的影响。

任意地面点的成像方程

周月琴，郑肇葆，李德仁等：SAR图像立体定位原理与精度分析，遥感学报，1998，2(4)

$$\begin{cases}-f\dfrac{a_1\rho(X-X_S)+b_1\rho(Y-Y_S)+c_1(Z_0-Z_S)}{a_3\rho(X-X_S)+b_3\rho(Y-Y_S)+c_3(Z_0-Z_S)}=\sqrt{(r_0+x)^2-f^2}\\-f\dfrac{a_2\rho(X-X_S)+b_2\rho(Y-Y_S)+c_2(Z_0-Z_S)}{a_3\rho(X-X_S)+b_3\rho(Y-Y_S)+c_3(Z_0-Z_S)}=0\end{cases}$$

式中，r_0为影像上的扫描延迟；f为等效焦距；(X,Y,Z_0)为地面点的坐标；(X_S,Y_S,Z_S)为该点所在扫描线对应的天线中心的地面坐标；$a_1,a_2,\cdots,c_3$为该扫描线姿态参数φ,ω,κ构成的方向余弦；ρ为修正系数。

关于潜热通量、显热通量、及光合作用率估计的一些半经验性模型

Olioso A. Chauki H. Courault D et al：通过将遥感数据同化到SVAT模型中对蒸散及光合作用进行估计。Remote Sensing of

Environment, 1999, 68

(1) 简化关系(Seguin 和 Itier, 1983):

$$LE_d = R_{nd} - A_1 - B_1(T_{s,14h} - T_{ax})$$

基于过度阻率的方法:

$$H_i = \rho c_p \frac{T_s - T_a}{r_a + r_{ex}}$$

$$LE_i = (1 - A_2)R_{ni} - H_i$$

基于辐射与大气动力学温度关系的方法:

$$H_i = \rho c_p \frac{T_{aer} - T_a}{r_a}$$

$$T_{aer} - T_a = (1 - A_3)(T_s - T_a)$$

二源方法:

$$H_i = \rho c_p \left(\frac{T_v - T_a}{r_a} + \frac{T_g - T_a}{r_a + r_c} \right)$$

土壤蒸发:

$$\frac{E_d}{E_{pd}} = \frac{\exp\left[A_4\theta_{(0-5)} + B_4\right]}{C_4\left\{1 + \exp\left[A_4\theta_{(0-5)}\right]\right\}} + (1 - C_4)$$

生物量生产:

$$\Delta MS = \varepsilon_b \left(A_5 + B_5 \frac{\rho_{nir}}{\rho_r} \right) \sum P_{AR}$$

式中，A_i、B_i 和 C_i 是经验系数；c_p 是空气的定压热容量；E_d 是日土壤蒸发率；E_{pd} 是日土壤潜在蒸发率；H_i 是瞬时显热通量；LE_i 是瞬时潜热通量；LE_d 是日潜热通量；$\sum P_{AR}$ 是累积入射光合作用有效辐射；r_a 是大气动力学阻率(冠层上方)；r_c 是土壤表面的大气动力学阻率；r_{ex} 是过度阻率；R_{ni} 是瞬时净辐射；R_{nd} 是日净辐射；T_a 是冠层上方某高度的气温；T_{aer} 是大气动力学温度；T_{ax} 是日最高气温；T_v 是植被表面温度；T_g 是土壤表面温度；T_s 是辐射表面温度；$T_{s,14h}$ 是14h 当地太阳时间的辐射表面温度；ΔMS 是生物量增量；ε_b 是吸收辐射转变为生物量的转变效率；ρ 是空气密度；ρ_r 和 ρ_{nir} 分别是红光和近红外反射系数；$\theta_{(0-5)}$ 是 0~5 cm 表层土中的水分。

(2) AliBi 模型(Olioso, 1992):

AliBi 模型是一个两层模型、分别在土壤表面(用下标 s 表示）及植被冠层(用下标 v 表示）计算能量平衡、可以对土壤蒸发与植被蒸腾分开进行模拟。

$$R_{nv} = LE_v + H_v$$

$$R_{ns} = LE_s + H_s + G$$

式中，R_{ni}、H_i、LE_i 和 G 分别表示净辐射、显热通量、潜热通量和地面热通量。

红外亮度温度 T_b 可从下式得到:

$$f_\lambda(T_b) = \varepsilon_{v,d,\lambda} f_\lambda(T_v) + \tau_{t,d,\lambda}\varepsilon_{s,d,\lambda} f_\lambda(T_g) + \rho_{t,d,\lambda} R_{g\lambda\downarrow,\lambda}$$

式中，T_v 和 T_g 分别是植被和土壤表面温度；$R_{g\lambda\downarrow,\lambda}$ 是在测量波段的入射辐射；$\varepsilon_{v,d,\lambda}$ 和 $\varepsilon_{s,d,\lambda}$ 分别是植被和土壤在观察方向上的发射率(下标 d 表示观察方向）；$\tau_{t,d,\lambda}$ 是热辐射的植被传输系数；$\rho_{t,d,\lambda}$ 是冠层反射系数；$f_\lambda(T)$ 是用于计算在测量波段 λ 的热发射的关于温度的函数。

LE_v 和 H_v 给为:

$$LE_v = \rho L \left(\frac{1}{h_v} + \frac{1}{g_v} \right)^{-1} \left[q_s^*(T_v) - q_{ac} \right]$$

$$H_v = \rho c_p h_v (T_v - T_{ac})$$

式中，ρ 是空气密度；c_p 是空气定压热容量；L 是汽化潜热；h_v 是湍流交换系数；T_i 和 q_i 分别表示空气温度和湿度；ac 和 v 这两个下标分别表示冠层内的空气和植被单元表面的空气。

(3) MAGRET 模型(Lagouarde, 1991; Courault 等, 1996):

MAGRET 模型只引入一个能量平衡来表示整个土壤-植被系统:

$$R_n = LE + H + G$$

潜热通量:

$$LE = \rho L \frac{q_s^*(T_s) - q_a}{r_a + r^*}$$

式中，T_s 是表面温度；r_a 是表面与大气之间的空气动力学阻率；r^* 是依赖于植被结构的表面阻率。

森林反射模型

Gemmell F: 利用反射反演模型和两个谱指数对一个具有变化的背景特性的站点根据热成像数据估计针叶林覆盖 Remote Sensing of Environment, 1999, 69

此处应用的森林反射模型是几何光学的二向反射

模型，在给定波段上沙地的反射系数 ρ 给为：

$$\rho = R_g g + R_d d + R_v v + R_s s$$

式中，R_g 是阳光照射的地面的信号；R_d 是荫蔽地面的信号；R_v 是阳光照射树冠的信号；R_s 是荫蔽树冠的信号；g 是像元中能观察到的被阳光照射背景的比例；d 是能观察到的荫蔽背景的比例；v 是能观察到的阳光照射树冠表面投射到背景上的比例；s 是能观察到的荫蔽树冠表面投射到背景上的比例。

$$v = f(1-g)$$

$$f = \beta F \frac{1-\Gamma_v P_v M_v / \Gamma_c}{1-M} + (1-\beta)F$$

式中，f 是树冠间互遮蔽的概率；Γ_c 是投影到视方向上阳光照射树冠的面积；Γ_v 是在背景上单个椭圆体的视阴影的面积；$F = \Gamma_c / \Gamma$，Γ 是在视方向或照射方向上背景被单个椭圆体遮蔽的面积；P_v 是一个树冠表面单元当在视方向上被互遮蔽时朝着太阳的条件概率；M_v 是在视方向上互遮蔽的概率；M 是互遮蔽比例。

当视顶角大于照射顶角时，方程成立，否则，$P_v \cdot M_v$ 被 $P_i \cdot M_i$ 所替代，这里 P_i 是一个树冠表面单元当在照射方向上被互遮蔽时朝着观测仪器的条件概率，M_i 是在照射方向上互遮蔽的概率；β 是在 0 到 1 之间变化的一个权重因子，其确定了群丛主要是由随机高度分布的树构成还是由具有一致的高度的树构成。

海洋表面油膜的 SAR 检测机制

蒋晓霞，朱振海：海洋表面膜特征的 SAR 图像探测．遥感学报，1999，3(1)

(1) 海洋表面膜特征的 SAR 成像机制：

海洋表面积上的散射截面积 $\sigma_0^{(1)}(\theta)_{ij}$ 模型：

$$\sigma_0^{(1)}(\theta)_{ij} = 4\pi k^4 \cos^4\theta \left|g_{ij}^{(1)}(\theta)\right|^2 W(2k\sin\theta, 0)$$

式中，$W(2k\sin\theta, 0)$ 为海洋表面粗糙度的二维海面波高谱；$g_{ij}^{(1)}(\theta)$ 为一次后向散射系数，下标 ij 表示入射和接收的极化方式；θ 为入射角；k 为电磁波波数。

对于水平极化方式：

$$g_{HH}^{(1)}(\theta) = \frac{\varepsilon_r - 1}{\left[\cos\theta + \left(\varepsilon_r - \sin^2\theta\right)^{1/2}\right]^2}$$

对于垂直极化方式：

$$g_{VV}^{(1)}(\theta) = \frac{(\varepsilon_r - 1)[\varepsilon_r(1+\sin^2\theta) - \sin^2\theta]}{\left[\varepsilon_r\cos\theta + \left(\varepsilon_r - \sin^2\theta\right)^{1/2}\right]^2}$$

式中，ε_r 为海水的相对介电常数。

(2) 洋表面油膜的 SAR 探测机制：

海洋表面波的阻尼模型：

$$y(f) = \frac{\sigma^S}{\sigma^0} = \frac{\sigma_{sp}^0(\theta) + \sigma_B^0(\theta)}{\sigma_{sp}^S(\theta) + \sigma_B^S(\theta)}$$

式中，σ^0 为无表面油膜覆盖海面的雷达后向散射系数；σ^S 为表面油膜覆盖海面的雷达后向散射系数；σ_{sp}^0 和 σ_B^0 分别为镜点散射和 Bragg 散射的后向散射系数。

微波辐射计系统模型

高飞，张俊荣：实时定标微波辐射计的仿真研究．遥感学报，1999，3(1)

(1) 实时定标原理：

天线温度 T_A 模型：

$$T_A = \frac{(V_A - V_2)T_1 - (V_A - V_1)T_2}{V_1 - V_2}$$

式中，T_1、T_2 为参考源 1、2 的温度；V_1、V_2、V_A 为对应的参考源和天线的输出电压。

(2) 系统模型：

频率特性模型：

$$H(j\omega) = \frac{H}{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_{RF}} - \frac{\omega_{RF}}{\omega}\right)}$$

式中，H 为滤波器的增益；ω_{RF} 为射频中间角频率；Q 为品质因数。

高度计系统设计及测高精度分析模型

郭伟，张俊荣，张升伟：星载雷达高度计系统设计及测高精度分析．遥感学报，1999，3(1)

(1) 高度计的接收功率模型：

$$P_r(t) = P_{FS}(t) \cdot q(t) \cdot S_r(t)$$

式中，$P_r(t)$ 表示平均接收功率；$P_{FS}(t)$ 为平坦海面的冲激响应；$q(t)$ 为海洋表面散射元的高度概率密度函数；$S_r(t)$ 为雷达系统点目标响应。

(2) 接收机热噪声引起的高度估值的标准差 $std\{h_{noise}\}$ 模型：

$$std\{h_{noise}\}=\frac{1}{S_{NR}}\times\frac{c\tau}{2}$$

$$S_{NR}=\frac{P_tG^2\lambda^2\sigma t_\tau}{(4\pi)^3kTN_FR^4}$$

式中，S_{NR} 为系统信噪比；t_τ 为发射脉冲宽度；G 为天线增益；k 为玻耳兹曼常数；T 为参考温度；N_F 为接收机噪声系数；σ 为目标的雷达截面。

海水微波辐射传输模式

吴明钰，罗贤：海水微波辐射传输模式和实验研究，遥感学报，1999，3(1)

(1) 热辐射模型：

$$B_f=\frac{2hf^3}{c^2\left(e^{hf/kT}-1\right)}$$

式中，B_f 为黑体的谱亮度；h 为 Planck 常数；k 为 Boltzman 常数；T 为物理学温度；f 为频率；c 为光速。

(2) 电磁波在有损介质中的传播特性模型：

$$P=\frac{E_t^2}{\eta}e^{-\alpha z}\cdot\cos(\omega\ t-\beta z)\cdot\cos(\omega\ t-\beta z-\phi)$$

式中，P 为电磁场的能量功率流；η 为波阻抗。

(3) 亮温温度 $T_B(f,\theta,P)$ 模型：

$$T_B(f,\theta,P)=A(f,\theta,P)-B(f,\theta,P)\times e^{-C(f,\theta,P)D}$$

式中，A, B, C 均与频率、观测角和极化方式有关；D 为冰厚。

互补相关方程

徐兴奎，庸洪智，田国良：互补相关理论在卫星遥感领域的应用研究，遥感学报，1999，3(1)

$$E+E_P=2E_{P0}$$

式中，E 为实际蒸散量；E_P 为潜在蒸发；E_{P0} 为整个区域充满湿润情况下的蒸散发量。

海洋水 CCD 成像仪输出模型

郑玉权，崔敦杰：海洋水色 CCD 成像仪光谱非线性校正，遥感学报，1999，3(2)

(1) 理想的光谱响应 S_0 模型：

$$S_0=K\overline{L(\lambda)}\Delta\lambda$$

$$\overline{L(\lambda)}=\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}L(\lambda)R(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}R(\lambda)\mathrm{d}\lambda}=\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}L(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\Delta\lambda}$$

式中，$L(\lambda)$ 为入射到成像仪光学系统入瞳处的光谱辐亮度；$R(\lambda)$ 为成像仪的光谱响应度；$\overline{L(\lambda)}$ 为波段内的平均光谱辐亮度；$\Delta\lambda=\lambda_2-\lambda_1$ 为带宽。

(2) 实际的光谱响应度模型：

$$S_{01}=R(\lambda_{k1})\overline{L_1(\lambda)}\Delta\lambda$$

$$S_{02}=R(\lambda_{k2})\overline{L_2(\lambda)}\Delta\lambda$$

式中，S_{01} 和 S_{02} 为选取的光谱辐亮度。

热辐射传输方程

陈良富，徐希孺：热红外遥感中大气下行辐射效应的一种近似计算与误差估计，遥感学报，1999，3(3)

$$L_i(\theta)=\tau_i(\theta)\varepsilon_i(\theta)B_i(T_s)+\hat{L_i}(\theta)+\tau_i(\theta)\int_{\Omega}f(\theta',\varphi',\theta,\varphi)L_i^{\uparrow}(\theta')\cos\theta'\mathrm{d}\Omega'$$

式中，$L_i(\theta)$ 表示视角为 θ 时遥感器所接收的第 i 波段的热红外辐射亮度；θ' 和 θ 为天顶角；φ' 和 φ 为方位角；$B_i(T_s)$ 表示第 i 波段地表温度为 T_s 时的普朗克黑体辐射亮度；$\varepsilon_i(\theta)$ 表示视角为 θ 时 i 波段地表比辐射率；$\tau_i(\theta)$ 表示视角为 θ 时 i 波段从地面到遥感器的大气透过率；$L_i^{\uparrow}(\theta)$ 表示视角为 θ 时 i 波段大气上行辐射；$L_i^{\uparrow}(\theta')$ 表示天顶角为 θ' 时 i 波段大气下行辐射；$f(\theta',\varphi',\theta,\varphi)$ 为地表双向反射分布函数；$\int_{\Omega}$ 为积分符号代表半球积分；$\mathrm{d}\Omega'$ 代表微分立体角。

高度计海面风速反演的模式函数

陈戈：卫星高度计反演海面风速——模式函数与应用实例，遥感学报，1999，3(4)

雷达后向散射截面 $\sigma_0(\theta)$ 与海面均方斜率 $\overline{s^2}$ 之间的关系模型：

$$\sigma_0(\theta)=\frac{\alpha|R(0)|^2}{\overline{s^2}}\sec^4\theta\exp\left(-\frac{\tan^2\theta}{\overline{s^2}}\right)$$

式中，$|R(0)|^2$ 为 Fresnel 反射系数；θ 为入射角；α 为比例系数。

PHI 成像光谱图像反射率转换模型

刘建贵，吴长山，张兵等：PHI 成像光谱图像反射率转换．遥感学报，1999，3(4)

1. 反射率转换方法

(1) 发射率反演模型：

$$R = \frac{L - L_0}{L_X}$$

式中，R 为像元某一波段的反射率；L 为相应的 DN 值；L_0 和 L_X 分别为由 LOWTRAN 7 所计算的 0 反照度表面的程辐射及 100%反射的朗伯体表面的反射辐照度。

(2) 混光谱法反演地物反射率模型：

$$b + kL_i = \sum_{n=1}^{c} f_{n,i} R_n + E_b$$

式中，E_b 为误差；k 和 b 为波段的增益和偏移；L_i 为光谱辐射值；$f_{n,i}$ 为最终单元在像元中的百分比，满足：$\sum_{n=1}^{c} f_{n,i} = 1$。

(3) 验线性法反演地物反射率模型：

$$DN = kR + b$$

式中，k 和 b 为系数。

2. 利用经验线性法进行反射率转换

反射率转换模型：

$$DN' = KR + b$$

$$K = \frac{N\sum(DN_i R_i) - \sum R_i \sum DN_i}{N\sum(R_i)^2 - (\sum R_i)^2}$$

$$b = \frac{\sum(DN_i R_i) - K\sum R_i^2}{\sum R_i}$$

式中，DN' 为两种地物的波段光谱响应值；R 为反射率；K 和 b 为参数。

树冠层中的辐射传输模型

王锦地，项月琴，李小文：考虑开放度的树冠层辐射传输模型及实验验证．遥感学报，1999，3(4)

1. 天空散射光在冠层中的辐射传输

(1) 介质层 di 底部向下的漫散射通量 E_{di-} 模型：

$$E_{di-} = E^{-} e^{-2\gamma\tau d_i}$$

$$\gamma = (1-\omega)^{1/2}$$

式中，γ 为描述该介质层中组分反射的参数；ω 为叶面反照率；τ 为介质层的消光系数。

(2) 介质层 di 底部向上的漫散射通量 E_{di+} 模型：

$$E_{di+} = R_{ff}^{\infty} E_{di-}$$

$$R_{ff}^{\infty} = \frac{1-\gamma}{1+\gamma}$$

2. 树冠层的开放度对不连续冠层中辐射传输的影响

(1) 开放度系数 $k_{open}(r,h)$ 模型：

$$k_{open}(r,h) = \frac{1}{\pi^2}\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2} P_{gap}(\theta_i,\varphi_i|r,h)\mathrm{d}\theta_i\mathrm{d}\varphi_i$$

$$P_{gap}(\theta_i,\varphi_i|r,h) = e^{-LK(\theta_i)S}$$

式中，$P_{gap}(\theta_i,\varphi_i|r,h)$ 为在给定点(r,h)、方向(θ_i,φ_i) 上的方向间隙率；r 为树冠中给定距树中心的距离；h 为给定点的高度；θ 和 φ 分别为天顶角和方位角；L 为组分单元的 FAVD；S 为在 θ_i 方向上透过组分的入射路径长度；$K(\theta_i)$ 为组分在 θ_i 方向上的投影系数，它是组分单元中平均叶面倾角的函数。

(2) 在(r, h)处的全部向下漫散射通量 $E_{-}(r,h)$ 模型：

$$E_{-}(r,h) = k_1\left(\sum E_{di-}\right) + k_2 E^{-}$$

$$k_1 = 1 - k_{open}k_0$$

$$k_2 = k_{open}k_0$$

式中，k_0 取决于 $k_{open}(r,h)$ 的域值。

一维辐射传输方程

徐希孺，王平荣：用蒙特-卡罗方法计算大气点扩散函数．遥感学报，1999，3(4)

$$-\frac{\mathrm{d}L(\Omega)}{\mathrm{d}Z} + K_e L(\Omega) = \int_{4\pi} K_s P(\Omega' \to \Omega) L(\Omega')\mathrm{d}\Omega'$$

式中，$L(\Omega)$ 为沿 Ω 方向传输的辐射亮度；K_e 为削弱系数；K_s 为散射削弱系数；$P(\Omega' \to \Omega)$ 为散射相位函数。

通过机载散射仪的土壤水分模型

Blumberg D G, Freilikher V, Lyalko I V et al：通过机载散射仪估计土壤水分(水分含量)：切尔诺贝利受灾区和 Negev 沙漠．Remote Sensing of Environment，2000，71

为了定义具有不同水分含量的各种土壤的复介电

常数，Peplinski 等(1995)提出了一个半经验性模型：
$\varepsilon m = \varepsilon' m - j\varepsilon'' m$

$$\varepsilon' = 1.15\left[1+\frac{\rho_b}{\rho_s}(\varepsilon_s^{\alpha})+W^{\beta'}\varepsilon_{fw}'^{\alpha}-W\right]^{1/\alpha}-0.68$$

$$\varepsilon'' = [m_v^{\beta''}\varepsilon_{fw}''^{\alpha}]^{1/\alpha}$$

式中，εm 是土壤-水分混合物的相对介电常数；ε_s 是固体土壤的相对介电常数；ρ_b 是土壤的体积密度；$\rho_s = 2.66\ \mathrm{g{\cdot}cm^{-3}}$ 是特定土壤粒子的密度；m_v 是体积水分含量；$\beta'' = 1.33797 - 0.603S - 0.166C$；$S$ 和 C 分别是沙石和黏土在土壤中的质量比例；$\beta' = 1.2748 - 0.519S - 0.152C$；$\alpha = 0.68$ 是一个经验性常数；$\varepsilon_{fw}' = \varepsilon_{w\infty} + \frac{\varepsilon_{w0}-\varepsilon_{w\infty}}{1+(2\pi f\tau_w)^2}$ 和 $\varepsilon_{fw}'' = \frac{2\pi f\tau_w(\varepsilon_{w0}-G\varepsilon_{w\infty})}{1+(2\pi f\tau_w)^2} - \frac{\sigma_{eff}(\rho_s-\rho_b)}{2\pi\varepsilon_0 f\rho_s W}$ 分别是 Debye 型修正方程给出的水介电常数的实部和虚部，ε_0 是真空的介电常数，τ_w 是水的弛豫时间，f 是频率，$\sigma_{eff} = 0.0467 + 0.2204\rho_b - 0.4111S + 0.6661C$ 是有效介电常数，ε_{w0} 是水的静电介电常数，$\varepsilon_{w\infty}$ 是在无穷大频率时的介电常数。

无限反射公式

Tejada Z P J, Miller J R, Mohammed G H et al：叶绿素荧光对植被表观反射系数的影响：Ⅱ．在实验室及飞机上利用超光谱数据对冠层的测量 Remote Sensing of Environment, 2000，74

可忽略的相应于在叶片的光学厚度堆积层中叶片间的多重反射的无限反射率：

$$R_{\infty 1} = \frac{r}{1-t^2}$$

包括相应于在叶片的光学厚度堆积层中叶片间多重反射率的无限反射率：

$$R_{\infty 2} = \frac{r}{1-\frac{2t^2}{1+(1-4t^2)^{1/2}}}$$

表现出单个叶片吸收和散射性质，以及呈现出各向同性散射性质的光厚介质特征的无限反射率：

$$R_{\infty 3} = \frac{1-\alpha^{1/2}}{1+\alpha^{1/2}}$$

式中，r 和 t 分别是树叶的反射系数与传输系数。

星载 SAR 的工作原理及其系统设计模型

汤振宇，王贞松：用曙光并行机辅助星载 SAR 系统中一些问题的设计．遥感学报，2000，4(1)

1. 星载 SAR 的工作原理

(1) 波形模型：

$$x(t) = \exp[\mathrm{j}(2\pi f_0 t + \pi k_r t^2)] \quad |t| \leqslant T_{\omega_0}/2$$

式中，f_0 是载频；k_r 为调频斜率；T_{ω_0} 为脉冲宽度。

(2) 距离向匹配滤波函数模型：

$$hr(t) = \exp[\mathrm{j}(2\pi f_0 t - \pi k_r t^2)]$$

(3) 方位向匹配滤波函数模型：

$$ha(x) = \exp\left(\mathrm{j}\frac{2\pi f_0}{Rc}x^2\right)$$

(4) 输出模型：

$$y(t,x) = T_{\omega_0}\cdot v_a\cdot T_s\times\sin c\left[\pi B_{\omega_0}(t-2R_0/c)\right]\times$$
$$\sin c\left[\frac{2\pi f_0}{R_0 c}v_a T_s(x-x_0)\right]\times\exp\left[\mathrm{j}2\pi f_0(t-2R_0/c)\right]$$

式中，$B_{\omega_0} = k_r T_{\omega_0}$ 为信号带宽；T_s 为合成孔径时间。

2. 星载 SAR 的系统设计

(1) 方位模糊度(A_{ASR}) 模型：

$$A_{ASR} \approx \frac{\sum_{\substack{m=-\infty\\ m\neq 0}}^{\infty}\int_{-B_p/2}^{B_p/2}G^2(f+mP_{RF})\mathrm{d}f}{\int_{-B_p/2}^{B_p/2}G^2(f)\mathrm{d}f}$$

式中，P_{RF} 为脉冲重复频率。

(2) 距离模糊度(R_{ASR}) 模型：

$$R_{ASR} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\frac{S_{aj}}{S_j}$$

式中，S_{aj}，S_j 分别为 S_{AR} 在第 j 个距离门所接收到的模糊回波噪声和期望回波信号的功率。

(3) 数据的传输速率(V_{DR}) (bitss^{-1})模型：

$$V_{DR} = 2n_B\cdot 12B_{\omega_0}[2(r_2-r_1)/c+T_{\omega_0}]P_{RF}$$

式中，n_B 为 I 通道或 Q 通道的量化 bit 数。

陆面温度反演算法

张霞，朱启疆，闫祥军：陆面温度反演算法——劈窗算法的敏感

度分析 遥感学报，2000，4(1)

(1) PRI 算法：

$$T_s = [T_4 + \gamma(T_4 - T_5)] \times [(5.5 - \varepsilon_4)/4.5] - 0.75T_4\Delta\varepsilon$$

式中，$\Delta\varepsilon = \varepsilon_4 - \varepsilon_5$；$\gamma = \frac{1 - t_{04}}{t_{04} - t_{05}}$；$t_{04}$，$t_{05}$ 为 4，5 通道的大气透过率；ε_4，ε_5 为 4，5 通道的比辐射率；T_4，T_5 为 4，5 通道的卫星亮温。

(2) BES 算法：

$$T_s = T_4 + \gamma(T_4 - T_5) + 50(1-\varepsilon)/\varepsilon - 300\Delta\varepsilon/\varepsilon$$

式中，$\varepsilon = \frac{\varepsilon_4 + \varepsilon_5}{2}$。

(3) BLI 算法：

$$T_s = 1.274 + T^+(1.0 + 0.15616\varepsilon^* - 0.482\Delta\varepsilon/\varepsilon^2) + T^-(6.26 + 3.98\varepsilon^* + 38.33\Delta\varepsilon/\varepsilon^2)$$

(4) PRA 算法：

$$T_s = \frac{1-\gamma}{\delta}T_4 - \frac{\gamma}{\delta}T_5 + c$$

(5) SOB 算法：

$$T_s = T_4 + A(T_4 - T_5) + B$$

式中，若 ω 代表总水汽含量，则，

$$A = 0.349\omega + 1.32 + (1.385\omega - 0.204)(1 - \varepsilon_4) + (1.506\omega - 10.532)(\varepsilon_4 - \varepsilon_5)$$

$$B = (1 - \varepsilon_4)/\varepsilon_4 T_5[-0.146\omega + 0.561 + (0.575\omega - 1.966)(\varepsilon_4 - \varepsilon_5)] - (1 - \varepsilon_5)/\varepsilon_5 T_5[-0.095\omega + 0.320 + (0.597\omega - 1.916)(\varepsilon_4 - \varepsilon_5)]$$

(6) UVM 算法：

$$T_s = T_4 + [1.0 + 0.58(T_4 - T_5)](T_4 - T_5) + 0.51 + \alpha(1 - \varepsilon) - \beta\Delta\varepsilon$$

式中，α，β 由大气湿度和表面温度决定。

星载 SAR 水下地形和水深遥感的仿真模型

黄韦艮，傅斌，周长宝等：星载 SAR 水下地形和水深遥感的最佳雷达系统参数模拟。遥感学报，2000，4(3)

(1) 纳维-斯托克斯方程：

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} - fv + g\frac{\partial \xi}{\partial x} + g\frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{c^2(h+\xi)} - \frac{\tau_x}{\rho(h+\xi)} = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + fu + g\frac{\partial \xi}{\partial y} + g\frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{c^2(h+\xi)} - \frac{\tau_y}{\rho(h+\xi)} = 0 \end{cases}$$

(2) 连续性方程：

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial[(h+\xi)u]}{\partial x} + \frac{\partial[(h+\xi)v]}{\partial y} = 0$$

上述两方程中，u，v 分别为 x，y 方向的流速；ξ 为相对于水平位势面高度；h 为海底与水平位势面之间的距离；f 为科氏参量；c 为谢才参量；τ_x，τ_y 分别为 x 和 y 方向的风应力；ρ 为海水密度；g 为重力加速度。

(3) 谱作用量平衡方程：

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\partial\Omega}{\partial k_x}\frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial\Omega}{\partial k_y}\frac{\partial A}{\partial y} - \frac{\partial\Omega}{\partial x}\frac{\partial A}{\partial k_x} - \frac{\partial\Omega}{\partial y}\frac{\partial A}{\partial k_y} = S$$

式中，$A(r,k,t)$ 为作用量谱；$\Omega(r,k,t)$ 为表观频率；$r(x,y)$ 为空间变量；k 为波数；$S(r,k,t)$ 为表征波浪组成波的能量增加和消耗过程的源函数。

辐射特性测量原理及数据处理模型

李青侠，张祖荫，郭伟等：面目标微波辐射特性实验模型。遥感学报，2000，4(4)

(1) 辐射计在方向 (θ,φ) 上观测到的视在温度模型：

$$T_{AP}(\theta,\varphi;\ H;\ p) = T_B(\theta,\varphi;\ p) + T_{SC}(\theta,\varphi;\ p)$$

式中，$T_B(\theta,\varphi;\ p)$ 为地物在 (θ,φ) 方向的 p 极化亮度温度；$T_{SC}(\theta,\varphi;\ p)$ 为天空引起的散射辐射温度。

(2) 从天线温度数据中反演视在温度模型：

$$T_{AP}(\omega) = \frac{T_A(\omega)}{G^*(\omega)}$$

(3) 从 T_{AP} 中剔除 T_{SC} 得到目标的亮度温度 T_B 模型：

$$T_B = T_{AP} - \frac{T_S - T_{AP}}{T_S - T_{DN}}T_{DN}$$

总光合作用估计模型

Choudhury B J：利用卫星数据及辅助数据估计总光合作用的方法及初步结果　Remote Sensing of Environment, 2001, 75

（1）单位面积的陆地植物群落碳的日积累率(dC/dt)：

$$\frac{dC}{dt} = A_g - R$$

也可表示为入射的日光辐射与辐射利用效率(RUE)(e)的积：

$$\frac{dC}{dt} = e \cdot I_{PAR}$$

式中，$A_g = 0.020 \cdot A_{PAR}$ 为日总的光合作用；R 为自养呼吸作用；A_{PAR} 是日总吸收的光合作用有效的辐射量。

树冠的即时总光合作用量 A_c($\mu mol\ CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)可表示为吸收的光照 Q($\mu mol\ photon \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)的函数：

$$A_c = \frac{0.044 \times 43.35 \times Q}{43.35 + 0.044Q}$$

（2）树冠的总光合作用和截拦的辐射模型：

1）叶面光合作用：

单位叶面总光合作用率(A_l；$\mu mol\ CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)与入射在叶面上的有效光合作用光子数($F_l$；$\mu mol\ photon \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)的关系可表示为：

$$A_l(F_l) = A_m \frac{(1+\eta) - [(1+\eta)^2 - 4\theta\eta]^{0.5}}{(2\theta)}$$

式中，$\eta = \varepsilon\alpha \frac{F_l}{A_m}$；$A_m$ 单位叶面最大总光合作用率($\mu mol\ CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)；$\varepsilon$ 是量子效率($\mu mol\ CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ PAR photon absorbed)；α 是叶面吸收的 P_{AR}；$\varepsilon\alpha$ 为表观量子效率($\mu mol\ CO_2 \cdot \mu mol^{-1}$ 入射光子)。

2）日总光合作用(I_{PAR})和辐射利用效率(R_{UE})：

树冠即时总的光合作用量(A_c)可表示为日照叶面与荫蔽叶面的光合作用之和对树冠厚度的积分：

$$A_c = \int [f_{sun}(L) A_{l,sun}(L) + f_{shade}(L) A_{l,shade}(L)] dL$$

式中，$A_{l,sun}$ 为日照叶面的光合作用；$A_{l,shade}$ 为荫蔽叶面的光合作用；f_{sun}, f_{shade} 分别为其相应的比例；L 为树冠厚度。

机载热红外扫描仪的信噪比分析模型

郭冠军，尤红建，李树楷：机载热红外扫描仪的信噪比研究　遥感学报，2001，5(2)

（1）系统信噪比 S_{NR} 模型：

$$S_{NR} \approx \frac{c_1 A_0 \alpha\beta\varepsilon\tau_a\tau_o D^*_{max} T^3}{\pi c_2^3 \lambda_{max} \sqrt{A_d \Delta f}} \times \cos\theta \left[2! \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda_2 T}\right) \cdot \sum_{l=0}^{2} \frac{1}{l!} \left(\frac{c_2}{\lambda_2 T}\right)^l - 2! \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda_1 T}\right) \cdot \sum_{l=0}^{2} \frac{1}{l!} \left(\frac{c_2}{\lambda_1 T}\right)^l \right]$$

（2）像元温度对信噪比的贡献 $S_{NR_{temp}}$ 模型：

$$S_{NR_{temp}} \approx \frac{c_1 c_2 A_0 \alpha\beta\varepsilon\tau_a\tau_o D^*_{max} T^2}{\pi c_2^3 \lambda_{max} \sqrt{A_d \Delta f}} \times \cos\theta \left[3! \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda_2 T}\right) \cdot \sum_{l=0}^{3} \frac{1}{l!} \left(\frac{c_2}{\lambda_2 T}\right)^l - 3! \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda_1 T}\right) \cdot \sum_{l=0}^{3} \frac{1}{l!} \left(\frac{c_2}{\lambda_1 T}\right)^l \right]$$

（3）发射率 ε 对信噪比的贡献 S_{NR_ε} 模型：

$$S_{NR_\varepsilon} \approx \frac{c_1 A_0 \alpha\beta\tau_a\tau_o D^*_{max} T^3}{\pi c_2^3 \lambda_{max} \sqrt{A_d \Delta f}} \times \cos\theta \left[2! \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda_2 T}\right) \cdot \sum_{l=0}^{2} \frac{1}{l!} \left(\frac{c_2}{\lambda_2 T}\right)^l - 2! \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda_1 T}\right) \cdot \sum_{l=0}^{2} \frac{1}{l!} \left(\frac{c_2}{\lambda_1 T}\right)^l \right]$$

（4）扫描角度变化对信噪比的贡献 $S_{NR\theta}$ 模型：

$$S_{NR\theta} \approx \frac{c_1 A_0 \alpha\beta\varepsilon\tau_a\tau_o D^*_{max} T^3}{\pi c_2^3 \lambda_{max} \sqrt{A_d \Delta f}} \times \sin\theta \left[2! \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda_2 T}\right) \cdot \sum_{l=0}^{2} \frac{1}{l!} \left(\frac{c_2}{\lambda_2 T}\right)^l - 2! \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda_1 T}\right) \cdot \sum_{l=0}^{2} \frac{1}{l!} \left(\frac{c_2}{\lambda_1 T}\right)^l \right]$$

式中，A_0 为光学系统有效的通光面积；$\alpha\beta$ 为瞬时视场的立体角；θ 为像元法线与像元和光学系统中心的

连线之间的夹角；τ_a 为大气的光谱透过率；τ_o 为光学系统的光谱透过率；λ_{max} 为探测器的比探测率的峰值 D^*_{max} 所对应的波长；ε 为像元的平均发射率。

星载 SAR 图像的两种实用化 R-D 定位模型

周金萍，唐伶俐，李传荣：星载SAR图像的两种实用化R-D定位模型及其精度比较．遥感学报，2001，5(3)

(1) 地球模型：

$$\frac{x_t^2+y_t^2}{R_e^2}+\frac{z_t^2}{R_p^2}=1$$

式中，R_e 为平均赤道半径；R_p 为极半径；(x_t,y_t,z_t) 为地面目标点位置。

(2) SAR 多普勒方程：

$$f_{DC}=-\frac{2}{\lambda R}(\vec{V}_s-\vec{V}_t)\cdot(\vec{R}_s-\vec{R}_t)$$

式中，f_{DC} 为多普勒频率；λ 为雷达波长；R 为斜距，在像素(i,j) 成像时刻 $R=R_{ij}$；V_s、V_t 分别为卫星平台和地面目标的速度矢量；R_s、R_t 分别为卫星平台和地面目标的位置矢量。

第二章　地物波谱与频谱特征

多光谱摄影原理

王长耀，郑兰芬：地面多光谱摄影试验研究　自然资源，1980，2

(1) 亮度系数 R 模型：

$$R=\frac{B}{B_{绝白}}$$

式中，B 为物体表面亮度；$B_{绝白}$ 绝对理想的白板表面亮度。

(2) 反射率模型：

$$反射率=\frac{反射能}{辐射能}\%$$

照像物镜所成像的照度模型和乳胶在正常曝光区段密度模型

钱灿圭，李世骏，陈沈斌：地物反射光谱与全色航空底片上密度的关系　自然资源，1980，4

(1) 照像物镜所成像的照度 E 模型：

$$E=\alpha\int RB_S \mathrm{d}\lambda$$

式中，B_S 为太阳在波长 λ 处的亮度；R 为地物在 λ 处的亮度系数；α 为常数。

(2) 乳胶在正常曝光区段密度 S 模型：

$$S=\gamma\left(\lg\alpha t-\lg H_i-\lg\int RB_S \mathrm{d}\lambda\right)$$

式中，γ 为直线延长线与横轴交角的正切，是底片的反差；t 为曝光时间；H 为曝光量。

漫反射率模型

Robinove C J, Chavez P S J, Gehring D et al：利用 Landsat 漫反射率差图像监测干旱土地　Remote Sensing of Environment，1981，11

$$\mathrm{Albedo}=\frac{\pi}{I\sin\alpha}\left(\frac{B_4}{G_4}+\frac{B_5}{G_5}+\frac{B_6}{G_6}+\frac{B_7}{G_7}\right)$$

式中，I 是在 4 个波段上的总的阳光辐射(70.13 m·W·cm^{-2})，α 是太阳的水平角，B_i 是像元在 Landsat 的波段 i 上的计数，G_i 是每单位辐射对计数的增益。

利用卫星辨识高于像素分辨率的地表温度场分析模型

Dozier J：利用卫星辨识高于像素分辨率的地表温度场　Remote Sensing of Environment，1981，11

(1) 在不考虑大气成分及其误差的条件下，被向下的辐射仪探测到的上行辐射可通过对普朗克函数 $\beta(\lambda,T)$ 与传感器的响应函数 $\Phi(\lambda)$ 的积进行积分而得：

$$L(T)=\frac{\frac{1}{\pi}\int_0^{\infty}\varepsilon_\lambda\beta(\lambda,T)\Phi(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\int_0^{\infty}\Phi(\lambda)\mathrm{d}\lambda}$$

式中，ε_λ 是大多数地表在波长 λ 处的发射率，ε_λ 在 AVHRR 的波段范围内相对独立于 λ。

(2) 指定 $L_3(T)$ 和 $L_4(T)$ 分别为 NOAA-6 波段 3 和 4 的辐射，表示为黑体温度的函数(即 $\varepsilon=1$)，其反函数分别用 $L_3^{-1}[\ ]$ 和 $L_4^{-1}[\ ]$ 表示。对一个由温度为 T_t、所占比例为 p 的目标和温度为 T_b 的背景组成的像点，在不考虑大气成分及其衰减的情况下，AVHRR 波段 3 和 4 探测到的辐射温度是：

$$T_j=L_j^{-1}[pL_j(T_t)+(1-p)L_j(T_b)]\qquad(j=3,4)$$

(3) T_t 和 p 的确定：

假设 T_b 已知，T_t 和 p 是下面方程的解：

$$L_j(T_j)-[pL_j(T_t)+(1-p)L_j(T_b)]=0,\ (j=3,4)$$

(4) 当 T_b 和 p 未知时，确定 T_t：

假设有两个相邻像点，其目标温度与背景温度都相同：

$$\frac{L_3(T_3^{(1)})-L_3(T_x)}{L_3(T_3^{(2)})-L_3(T_x)}-\frac{L_4(T_4^{(1)})-L_4(T_x)}{L_4(T_4^{(2)})-L_4(T_x)}=0$$

$$\left(T_3^{(1)}\neq T_3^{(2)}\quad T_4^{(1)}\neq T_4^{(2)}\right)$$

式中，变量 T_x 代表未知的温度(T_t 或 T_b)，上标(1)和(2)分别代表像元 1 和 2，通过迭代方法可从以上方程解出 T_x。

空载雷达对土壤水分的响应模型

Bradley G A, Ulaby F T：空载雷达对土壤水分的响应．Remote Sensing of Environment，1981，11

(1) 雷达后向散射系数 σ^0 与土壤水分的最优估计模型可用线性最小二次方差法得到：

$$\sigma^0(\text{dB}) = 0.133m_{FC}(0-5) - 14.34$$

式中，$\sigma^0(\text{dB})$ 是在 4.6 GHz 波段，HH 极化方向，及入射角为 10°，观测角为底角的条件下测量的，$m_{FC}(0\sim5)$ 是在土壤表层 0~5 cm 内的水分。

(2) 考虑在 4.75 GHz 波段，HH 极化方向，及入射角为 10°，线性回归方程为：

$$\sigma^0(\text{dB}) = 0.0825m_{FC}(0-5) - 12.729$$

其相关系数为 0.802。

类内与类间离散性比值模型

戴昌达，陈宝雯，倪健华等：土壤资源遥感最佳波段选择的数理统计法．自然资源，1981，4

$$m = \left[\left(\frac{\sum_{i=1}^{n_1}\sum_{j=i+1}^{n_1}(X_i - X_j)^2}{2n_1(n_1-1)}\right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{\sum_{i=1}^{n_2}\sum_{j=i+1}^{n_2}(Y_i - Y_j)^2}{2n_2(n_2-1)}\right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{\sum_{i=1}^{n_3}\sum_{j=i+1}^{n_3}(Z_i - Z_j)^2}{2n_3(n_3-1)}\right)^{\frac{1}{2}}\right] \Bigg/ \left[\left(\frac{\sum_{i=1}^{n_1}\sum_{j=i+1}^{n_2}(X_i - Y_j)^2}{n_1 n_2}\right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{\sum_{i=1}^{n_1}\sum_{j=i+1}^{n_3}(X_i - Z_j)^2}{n_1 n_3}\right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{\sum_{i=1}^{n_2}\sum_{j=i+1}^{n_3}(Y_i - Z_j)^2}{n_2 n_3}\right)^{\frac{1}{2}}\right]$$

式中，X, Y 和 Z 为 3 类土壤的光谱反射率；n_1，n_2 和 n_3 为 3 类土壤的样品数。

归一化亮度温度定义模型

Wang J R., McMurtrey J E, Engman E T et al：对裸地及植被在 1.4 GHz 和 5 GHz 频率处的辐射测量．Remote Sensing of Environment，1982，12

$$T_{NB} = \frac{T_B}{T_S}$$

式中，T_B 是亮度温度的测量值；T_S 是在深度为 1.25 cm 处测得的物理温度。

城市区域热红外成像发射率变化的测算模型

Artis D A, Carnahan W H：城市区域的热红外成像发射率的变化性的测量．Remote Sensing of Environment，1982，12

(1) 一个灰体的辐射 $L_{GB}(T,\lambda)$ 可写为：

$$L_{GB}(T,\lambda) = \frac{\varepsilon\beta}{\lambda^5(e^{\alpha/\lambda T} - 1)}$$

式中，$\alpha = hc/K$；$\beta = 2hc^2/\Omega$；h 是普朗克常数，c 是光速；Ω 是一个球面度；λ 是发射的辐射波长，K 是 Boltzmann 常数；T 是观察对象的运动学温度；ε 是表面发射率。

(2) T 计算公式为：

$$T = \frac{T_B}{1 + (\lambda T_B/\alpha)\ln\varepsilon}$$

式中，T_B 是亮度温度。

(3) 发射率计算公式：

$$\varepsilon = \exp\left[\frac{\alpha(T'_B - T_B)}{T_B T'_B(\lambda' - \lambda)}\right]$$

式中，T'_B 是相应于波长 λ' 的亮度温度

$$\Delta T_B = \frac{\Delta\varepsilon\lambda T^2}{\alpha\varepsilon\left(1 - \frac{\lambda T\ln\varepsilon}{\alpha}\right)}$$

可见光的反射和偏振百分比计算公式

Curran P J：利用偏振可见光作为植被分类的辅助方法．Remote Sensing of Environment，1982，12

(1) 可见光的反射百分比(percent reflected visible light，percent RVL)：

$$\text{RVL百分比} = \frac{\text{土地覆盖图像色调}}{\text{目标物图像色调}} \times 100$$

(2) 可见光的偏振百分比(percent polarized visible light，percent PVL)：

$$\text{PVL百分比} = \frac{\text{RVL(max)百分比} - \text{RVL(min)百分比}}{\text{RVL(max)百分比} + \text{RVL(min)百分比}} \times 100$$

通过红外测温法测量湿度的测算模型

Idso S B：通过红外测温法测量湿度．Remote Sensing of Environment，1982，12

(1) 无云天空在 10.5 ~ 12.5 μm 及 8 ~ 14μm 波段

范围的顶角发射率(ε) 可表示为场景尺度的气温(T_0, K)和水蒸气压(e_0, mb)的函数：

$$\varepsilon_{10.5\sim12.5} = 0.10 + 3.53\times10^{-8} e_0^2 \times \exp(3000/T_0)$$

$$\varepsilon_{8\sim14} = 0.24 + 2.98\times10^{-8} e_0^2 \times \exp(3000/T_0)$$

(2) 发射率定义为：

$$\varepsilon_{10.5\sim12.5} = \frac{f(T_{BW})_{10.5\sim12.5}\sigma T_{BW}^4}{f(T_0)_{10.5\sim12.5}\sigma T_0^4}$$

$$\varepsilon_{8\sim14} = \frac{f(T_{BW})_{8\sim14}\sigma T_{BW}^4}{f(T_0)_{8\sim14}\sigma T_0^4}$$

式中，T_{BW}是 10.5 ~ 12.5 μm 及 8 ~ 14μm 波段范围内天空的顶角亮度温度，σ是 Stefan-Boltzmann 常数，因子$f(T_{BW})$和$f(T_0)$分别是温度为T_{BW}和T_0的黑体辐射的能量占总通量的比例，其计算公式如下：

$$f(T)_{10.5\sim12.5} = -0.2338 + 0.2288\times10^{-2}T - 0.3617\times10^{-5}T^2$$

$$f(T)_{8\sim14} = -0.6732 + 0.6240\times10^{-2}T - 0.9140\times10^{-5}T^2$$

水稻含水率及其鉴别指数模型

田国良，郭世忠：水稻的光谱反射特性，自然资源，1982，2

(1) 水稻含水率W模型：

$$W = a + b\rho_{680} + c\rho_{800}$$

式中，ρ_{680}，ρ_{800}分别为水稻在 680nm 和 800nm 处的反射率值(%)；a, b, c为回归系数。

(2) 鉴别指数DI模型：

$$DI = \frac{\Delta\rho}{\sigma_{Tot}\sqrt{N}}$$

$$\sigma_{Tot} = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2 + 2\gamma\sigma_A\sigma_B}$$

式中，$\Delta\rho$为两种作物平均反射率的差；σ_{Tot}为合并标准差；γ为作物A和作物B的相关系数；σ_A,σ_B分别为作物A、B的标准差；N为作物A和B的测量总次数。

土地利用的聚类分析模型

徐彬彬：根据光谱资料进行土地利用的聚类分析 自然资源，1982，3

欧氏距离d_{ik}模型：

$$d_{ik} = \sqrt{\sum_{j=1}^{m}\left(x_{ij}^* - x_{kj}^*\right)^2} \quad (i,k = 1,2,\cdots,n)$$

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{S_j}$$

式中，d_{ik}为第i个和第k个样品之间的欧氏距离；n为样品序号；m为划分的波段数；x_{ij}^*，x_{kj}^*分别为第i，k个样品在第j波段的反射率的标准化值；$\bar{x}_j$为第j波段所有样品反射率平均值；S_j为第j波段的反射率标准差；x_{ij}为第i样品在第j波段反射率的观测值。

基于 AVHRR 卫星图像的植被分类模型

Norwine J, Greegor D H：基于 AVHRR 卫星图像的植被分类 Remote Sensing of Environment，1983，13

(1) 水文因子(HF)的定义：

$$HF_i = HF_{i-1} + P_i - [EP(TX_i, TN_i)\cdot HF_{i-1}/CAP\cdot 30]$$

式中，HF_i是第i天的水文因子；P_i是第i天的降水量；EP是总蒸发函数；TX_i是第i天的最高温度；TN_i是第i天的最低温度；CAP是HF的最大取值，$0\leqslant HF\leqslant CAP$。

(2) 植被-水文因子(I_{vh})的定义：

$$I_{vh} = ND\times HF$$

式中，ND是归一化植被指数。

玉米与高粱的多成分模型

Ulaby F T, Allen C T, Eger G：微波后向散射系数与叶面积指数的关系．Remote Sensing of Environment，1984，14

$$\sigma_{can}^0(\theta) = A_l[1 - \exp(-B_l L/h_1)]\times\cos\theta[1 - \gamma_l^2(\theta)] + A_{st}m_v h_2\gamma_l^2(\theta)\sin\theta + [C_s(\theta)m_s]\gamma_l^2(\theta)\gamma_{st}^2(\theta)$$

$$\gamma_l^2(\theta) = \exp(-2\alpha_l L\sec\theta)$$

$$\gamma_{st}^2(\theta) = \exp(-2\alpha_{st} m_v h_2 \sec\theta)$$

式中，L是叶面积指数；h_1是叶冠层的有效高度；m_v是冠层的体积水分含量；h_2是植物秆的高度；m_s是土壤体积水分含量；θ是相对于底角的入射角；A_l、A_{st}、C_s、α_l及α_{st}是对给定频率、角度及极化方向条件下对给定作物种类的常数。

绿度计算模型

Crist E P：文化及环境因子对玉米和大豆谱发展模式的影响 Remote Sensing of Environment，1984，14

$$G(t)=\frac{A}{1+Q^2(t-t_p)^2} \qquad (t<t_p)$$

$$G(t)=\frac{(A-25)\cdot g(\alpha,\Delta)}{\pi}\left(\operatorname{arccot}[\alpha(t-t_p-\Delta)]\right)+25 \qquad (t>t_p)$$

式中，$G(t)$是时刻t的绿度；A是函数的最大值(峰值)，t_p是函数最大值对应的日期；Q是第一个半峰值到峰值的时间的倒数；α是峰值后曲线形状的控制因子；Δ是从峰值到第二个半峰值的时间；$g(\alpha,\Delta)=\pi/\operatorname{arc}\cot(-\alpha\cdot\Delta)$(使函数在$t=t_p$时连续)。

植物水分胁迫的微波遥感模型

Paloscia S, Pampaloni P：植物水分胁迫的微波遥感 Remote Sensing of Environment，1984，16

(1) 从Ka波段(36 GHz)测量的归一化亮度温度(T_N)与植被顶部的大气中水蒸气压(VP)的关系为：

$$T_N=1-0.020VP \qquad (谷物)$$

$$T_N=1-0.014VP \qquad (小麦)$$

(2) 极化指数定义为：

$$PI=\frac{T_{b_V}-T_{b_H}}{\frac{1}{2}(T_{b_V}+T_{b_H})}$$

式中，T_b是Ka波段的亮度温度；下标V和H分别表示亮度温度的垂直和水平成分。

PI与玉米的作物水分胁迫指数(CI)的关系为：

$$PI=1.8(CI)^{-0.54}$$

作物绿度模式及其与四波段平均反射率的关系模型

张仁华：黄淮海地区主要农作物的光谱结构与时相分析方法．地理研究，1984，3(2)

(1) 绿度模式一：

$$G_1=\frac{MSS7}{MSS5}$$

$$G_2=\sqrt{\frac{MSS7}{MSS5}}$$

$$G_3=\sqrt{\frac{MSS7-MSS5}{MSS7+MSS5}}$$

$$G_4=\sqrt{\frac{MSS7-MSS5}{MSS7+MSS5}+0.5}$$

式中，G为绿度；$MSS7$为-0.81~1.1 μ的平均反射率；$MSS5$为0.6~0.7 μ的平均反射率值。

(2) 绿度模式二：

$$G_1'=\frac{TM4}{TM2}$$

$$G_3'=\sqrt{\frac{TM4-TM2}{TM4+TM2}}$$

$$G_2'=\sqrt{\frac{TM4}{TM2}}$$

$$G_4'=\sqrt{\frac{TM4-TM2}{TM4+TM2}+0.5}$$

式中，$TM4$为0.76~0.96 μ的平均反射率；TM2为0.52~0.60 μ的平均反射率值。

水资源联合利用的合理性分析模型

左大康，刘昌明，许越先等：黄河以北地区东线引江问题的探讨．地理研究，1984，3(2)

(1) 合理性分析：

$$C_V=10.04(A+10000)^{-0.34}$$

式中，C_V为流域面积；A为年径流量变差系数。

(2) C_V和A的关系模型：

$$C_{VR}(\beta_1A_1+\beta_2A_2+\cdots\beta_iA_i+\cdots+\beta_nA_n)<\beta_1C_{VR}(A_1)+\beta_2C_{VR}(A_2)+\cdots+\beta_iC_{VR}(A_i)+\cdots+\beta_nC_{VR}(A_n)$$

式中，β_i为任意实数，且$0<\beta_i<1$，A_i为第i个流域面积。

混合影响分析(ANOVA)模型

Toll D L：Landsat热成像传感器参数对土地覆盖分类的影响 Remote Sensing of Environment，1985，17

$$Y_{ijk}=\mu+A_i+B_j+C_k+AB_{ij}+AC_{ik}+BC_{jk}+ABC_{ijk}-E_{ijk}$$

式中，Y_{ijk}是对应第i个空间分辨率，第j个波段，第k个量化阶数的总的分类精度；μ是总的实际精度的平均值；A_i是第i个空间分辨率的影响；B_j是第j个波

段的影响；C_k 是第 k 个量化阶次的影响；AB_{ij} 是第 i 个空间分辨率与第 j 个波段的相互作用的影响；AC_{ik} 是第 i 个空间分辨率与第 k 个量化阶数的相互作用的影响；BC_{jk} 是第 j 个波段与第 k 个量化阶数的相互作用的影响；ABC_{ijk} 是第 i 个空间分辨率与第 j 个波段及第 k 个量化阶数的相互作用的影响；E_{ijk} 是随机误差。

土壤水分影响的观测模型

Wang J R：根据对轨道微波辐射计观测土壤水分的影响。Remote Sensing of Environment，1985，17

前期降水指数(I_{ap})：

$$I_{ap_i} = R_i^{0.891} + (I_{ap_{i-1}})k$$

式中，R_i 是总降水量的日平均值；i 表示估计的日期。

$$k = 1.164 - 0.015(T_A)$$

式中，T_A 是在求和期间的平均气温。

玉米冠层吸收光合作用有效辐射的光谱估计模型

Gallo K P, Daughtry C S T, Bauer M E：玉米冠层吸收光合作用有效辐射的光谱估计　Remote Sensing of Environment，1985，17

(1) 绿度指数(I_g)与反射系数因子的关系式为：

$$I_g = -0.4894RF_1 - 0.6125RF_2 + 0.1729RF_3 + 0.5954RF_4$$

式中，RF_1 ~ RF_4 分别是在波段 500~600、600~700、700~800 和 800~1100 nm 的反射系数因子。

(2) 日入射光合作用光子通量密度(PPFD)计算公式为：

$$\mathrm{PPFD} = 0.5(SR)4.6 \times 10^{-6}$$

式中，SR 是日入射的太阳辐射；4.6×10^{-6} 是转换因子。

(3) PAR_0 透射过冠层的比例(TPAR′)为：

$$\mathrm{TPAR}' = \mathrm{TPAR}/\mathrm{PAR}_0$$

式中，PAR_0 是总入射太阳辐射中的光合作用有效辐射。TPAR 是入射 PAR_0 的透射过冠层到达地面的辐射量。

(4) 吸收 PAR 的比例为：

$$\mathrm{APAR}' = 1.0 + \mathrm{RPAR}'_s - \mathrm{TPAR}' - \mathrm{RPAR}'_c$$

式中，$RPAR'_s$ 是 PAR_0 在冠层下被土壤反射的比例；$RPAR'_c$ 是 PAR_0 被冠层反射的比例。

地面上总生物量计算公式

Weiser R L, Asrar G, Miller G P et al：从光谱测量值评估牧场生物物理特性　Remote Sensing of Environment，1986，20

$$GP = \sum_{t=1}^{N} I_0 K_f E_{PAR} K_m$$

式中，I_0 是日太阳辐射能量；K_f 是在光合作用有效光谱内的辐射能量所占比例；E_{PAR} 是光合作用有效辐射的吸收比例；K_m 是光化学转化因子；其取值范围为 1.4~3.4 (g · MJ^{-1})；t 是时间；N 是天数。

辐照光谱计算模型

Baret F, Champion I, Guyot G et al：利用高光谱分辨率辐射计监测小麦冠层。Remote Sensing of Environment，1987，22

(1) 辐照光谱 $(P_i)_\lambda$ 和辐射光谱 $(P_r)_\lambda$ 可由下面的关系式确定：

$$(P_i)_\lambda = (I_i)_\lambda - (I_0)_\lambda / n$$

$$(P_r)_\lambda = [(I_r)_\lambda - (I_0)_\lambda] / n$$

式中，I_i 是辐照度(包括太阳直射辐照和天空的漫射辐照)；I_0 是辐射计的背景信号，包括光电二极管的暗电流，为了使接收系统的噪音最小化，测量重复 n 次，辐射 I_r 在视底角测量，也重复 n 次。

(2) 反射谱 $(R)_\lambda$：

$$(R)_\lambda = (P_i)_\lambda / (P_r)_\lambda$$

有效反射率的计算模型

Markham B L, Barker J L：处理过的美国 Landsat MSS 数据的辐射特性。Remote Sensing of Environment，1987，22

通过下面的式子谱辐射可能转换为到达卫星或外大气层的有效反射率：

$$\rho_p = \frac{\pi \cdot L_\lambda \cdot d^2}{E_{SUN_\lambda} \cdot \cos\theta_s}$$

式中，ρ_p 是无单位的到达卫星的有效反射率；L_λ 是到达传感器光圈的谱辐射；d 是地球-太阳距离，E_{SUN_λ} 是外大气层平均太阳谱辐照；θ_s 是太阳顶角。

地面温度的修正算法

Vukovich F M, Toll D L, Murphy R E：从 NOAA-7 卫星数据导出的塞内加尔地表温度与漫反射率的关系。Remote Sensing of Environment，1987，22

$$T_g = T_c(e_s / e_g)^{1/n}$$

式中，T_g 是地面温度；T_c 是大气校正温度；e_g 是在

11μm 波段处特定的地表面发射率；e_s 是在 11μm 波段处海面的发射率．对波段 4 有 n=4.5．

空间自相关模型

Pickup G, Foran B D: 利用光谱及空间变化监测不活泼景观的覆盖变化．Remote Sensing of Environment，1987，23

(1) 系统的空间自相关的定义：

$$c = f|I|^2$$

式中，c 是自协方差函数；I 是一个图像的 MMS 指数值的傅氏变换；f 是傅氏变换的逆变换。

(2) 间距为 g 时的自相关系数给为：

$$r_g = c_g / c_0$$

式中，c_0 是间距为 0 时的自协方差。

森林群丛在 X-，C-及 L-波段的后向散射及衰减特性的测量模型

Hoekman D H：森林群丛在 X-，C-及 L-波段的后向散射及衰减特性的测量．Remote Sensing of Environment，1987，23

(1) 植被层的灰度系数(γ_{veg}) 用相同小粒子组成的低密度云的单重散射来模拟：

$$\gamma_{veg} = \sigma / 2Q[1-\exp(-2NQh)/\cos\theta_i]$$

式中，N 是单位体积内的粒子数；h 是植被层的高度，σ 是一个粒子的雷达波截面积；Q 是一个粒子的衰减截面积。

(2) 假设土壤的散射与植被散射间没有相干性，总的灰度系数为：

$$\gamma_{total} = \gamma_{veg} + \exp(-2Qh/\cos\theta_i)\cdot\gamma_{soil}$$

大气校正模型

Singh S M, Saull R J：大气校正对 AVHRR 获取的多时段的植被指数动力学解释的影响．Remote Sensing of Environment，1988，25

$$L(\lambda) = L_r(\lambda) + L_a(\lambda) + L_s(\lambda)t(\lambda,\theta)$$

式中，$L(\lambda)$ 是卫星传感器记录的辐射；$L_r(\lambda)$ 是 Rayleigh 路径辐射；$L_a(\lambda)$ 是气溶胶的路径辐射；$L_s(\lambda)$ 是发自表面的辐射；$t(\lambda,\theta)$ 是从像素点到传感器的漫射透射率；λ 是考虑波段的中心波长；θ 是表面局部法向与像素到传感器方向间的夹角；其计入了地球类球形状的影响。

$$L_x(\lambda) = E_o(\lambda)T_{oz}(\lambda,\mu,\mu_0)\tau_x(\lambda)\times [P_x(\psi_-) + \rho(\lambda)P_x(\psi_+)]/\mu$$

式中，对 Rayleigh 散射 $x=r$，对气溶胶 $x=a$；$\mu=\cos\theta$；$\mu_0=\cos\theta_0$，θ_0 是太阳顶角；$E_o(\lambda)$ 是对太阳地球距离变化进行了校正的大气顶部的太阳辐射；$T_{oz}(\lambda,\mu,\mu_0)$ 是下行的太阳辐射和上行的路径辐射穿过臭氧层的透射率；$\tau_x(\lambda)$ 是光学厚度；$\psi_-(\psi_+)$ 是后向(前向)散射角；$P_x(\psi)$ 是相函数；$\rho(\lambda)$ 是表面反射系数。

主成分分析方法

Suits G, W Malila, Weller T：利用一个传感器的信号作为另一个传感器信号的替代值的方法．Remote Sensing of Environment，1988，25

$$MSS1 = A + B\cdot MSS2 + C\cdot MSS4$$

$$MSS2 = \beta_0 + \beta_1 AVHRR1 + \beta_2 AVHRR2$$

$$MSS4 = \gamma_0 + \gamma_1 AVHRR1 + \gamma_2 AVHRR2$$

$$MSS1 = (A + B\beta_0 + C\gamma_0) + (B\beta_1 + C\gamma_1)AVHRR1 + (B\beta_2 + C\gamma_2)AVHRR2$$

式中，A，B，C，β_0，β_1，β_2，γ_0，γ_1 和 γ_2 均是参数。

叶绿素浓度的估算模型

田国良，倪晓东，宋福等：用光谱数据估算叶绿素浓度．环境遥感，1988，3(1)

水中叶绿素浓度 $C_c(\mathrm{mg\cdot m^{-3}})$ 模型(以 11 个波长为中心，带宽为 10mm)：

$$C_c = B_0 + B_1R_{430.6} + B_2R_{460.9} + B_3R_{491.6} + B_4R_{519.6} + B_5R_{561.9} + B_6R_{585.0} + B_7R_{620.2} + B_8R_{655.5} + B_9R_{684.9} + B_{10}R_{705.5} + B_{11}R_{786.2}$$

式中，各波长下的 R 是水体反射率；$B_0 \sim B_{11}$ 为回归系数，它与水面状况、太阳高度等因素有关。

卫星监测海洋的理论模型

卡尔·海因斯·斯捷凯尔达：卫星监测海洋．环境遥感，1988，3(4)

(1) 波长为 λ 的总辐射度 L^λ 模型：

$$L^\lambda = L_R^\lambda + L_A^\lambda + t^\lambda L_W^\lambda$$

式中，L_R^λ 为瑞利散射；L_A^λ 为气溶胶散射；L_W^λ 为穿出海面并穿过大气的后向散射；t^λ 为大气透过率。

(2) 光强度方程：

$$I=\int_0^{\infty}\Phi_\lambda I_{0\lambda}e^{-\alpha_\lambda z}\mathrm{d}\lambda$$

式中，I 是在深度为 Z 的海水中通过带通滤波器 Φ_λ 观察到的电磁波的强度；Φ_λ 是在波长 λ 的整个区间按光谱间隔归一化的、是电磁波在海面时的强度；α_λ 为光谱衰减系数

(3) 晴朗天气条件下的辐射模型：

$$N_s=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}e_s(\lambda)\beta(\lambda,T_s)\mathrm{d}\lambda$$

$$N_a=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\int_{P_0}\beta[\lambda,T(P)]\frac{\mathrm{d}\tau(\lambda,P)}{\mathrm{d}P}\mathrm{d}P\mathrm{d}\lambda$$

$$N(T)=N_s\tau_s+N_a=N_s-(N_s\alpha_s-N_a)$$

式中，N_s 是在海面温度为 T_s、在 (λ_1,λ_2) 的带宽内由海面发射的总能量；β 为普朗克辐射度；e_s 为海面发射率；N_a 是在 (λ_1,λ_2) 通带内大气的辐射能；$T(P)$ 是气压为 P 的平面的大气温度；$\tau(\lambda,P)$ 为从气压 P 的平面到气压为 0 的大气层顶的大气透射率；P_0 为海面大气压；$N(T)$ 是由海洋监测卫星(辐射计)在波段(λ_1,λ_2)范围内接收到的总辐射能量。

(4) 辐射计的亮度温度 T_B 模型：

$$T_B=\varepsilon T_{W\tau H}+(1-\varepsilon)T_{S\tau H}+\int_0^H T_A(h)(\partial\tau/\partial h)\mathrm{d}h$$

式中，T_W、T_S 和 T_A 分别为海面温度、(天空)亮度温度、大气温度；ε 和 τ 分别为海面发射率、大气透过率；h 为高出海平面的高度；H 为辐射计的飞行高度。

(5) 海洋起伏 $\overline{H}(x)$ 模型：

$$\overline{H}(x)=\frac{1}{N}\sum_i^N H_i(x)$$

(6) 涡流 $H_c(x)$ 模型：

$$H_c(x)=\overline{H}(x)-H_g$$

式中，H_g 为海面基准值。

冠层结构指数的计算模型

Moran M S, Pinter P J, Clothier B E et al: 水胁迫对冠层结构及灌溉的紫花苜蓿的光谱指数的影响. Remote Sensing of Environment, 1989, 29

冠层结构指数可利用测度值[入射的余弦值(CI)和凹陷度($D_{cuppedness}$)] 来表示：

$$CI=\cos(\varphi_{leaf}-\varphi_{solar})\cos(\theta_{leaf}-\alpha_{solar})$$

$$D_{cuppedness}=1.0-(L_{S_c}/L_{S_t})$$

式中，L_{S_c} 是目前伸展的叶片；L_{S_t} 是总的可能伸展的叶片；φ_{leaf} 为叶片方位角；φ_{solar} 为太阳方位角；θ_{leaf} 为叶片天顶角；α_{solar} 为太阳高度角。

加权差植被指数

Clevers J G P W：利用加权红外-红光植被指数通过土壤水分校正估计叶面积指数. Remote Sensing of Environment, 1989, 29

$$r'_{ir}=r_{ir}-r_r$$

式中，r'_{ir} 是加权差植被指数；r_{ir} 是总的近红外反射系数的测量值；r_r 是总的红光反射系数的测量值。

叶片水分含量变化探测模型

Hunt E R, Jr, Rock B N：利用近红外及中红外反射系数探测叶片水分含量的变化. Remote Sensing of Environment, 1989, 30

(1) 叶片水分含量指数 (I_{lwc})：

$$I_{lwc}=\frac{-\ln[1-(R_{1.6}^D-R_{1.6})]}{-\ln[1-(R_{1.6}^D-R_{1.6}^{FT})]}$$

式中，$R_{1.6}^D$，$R_{1.6}$ 和 $R_{1.6}^{FT}$ 分别是干燥空气中叶片、含水叶片及充分膨胀叶片在 1.6μm 波长处的反射系数因子。

(2) I_{lwc} 对负透射率的灵敏度可用下式表示：

$$I_{lwc}=\frac{-\ln[1-f\cdot(R_{1.6}^D-R_{1.6})]}{-\ln[1-f\cdot(R_{1.6}^D-R_{1.6}^{FT})]}$$

式中，　是变化因子，在波长为 1.6μm时，当透射率为 0 时，其值为 1.0，当 $T_{1.6}=R_{1.6}$ 时，其值变化到 2.0。

二向性反射和方向波谱特征模型

李小文：地物的二向性反射和方向波谱特征. 环境遥感，1989，4(1)

(1) 二向性反射分布函数(f_{brd})模型：

$$f_{brd}=\frac{1}{\pi}\cdot\frac{\int_A\int R(s)\langle s,i\rangle\langle s,r\rangle I(i,s)I(r,s)\mathrm{d}s}{A\cdot\cos\theta_i\cdot\cos\theta_r}$$

式中，A 为像元面积；ds 为 A 上反射入射光的小面积元，该面积元可以近似为漫反射表面，其反射系数为 $R(s)$，其法线与 i,r 方向夹角的余弦分别为 $<s,i>$ 和 $<s,r>$；$I(i,s)$ 与 $I(r,s)$ 为从 I,r 方向 ds 的可见度；注意此处 $R(s)$ 为实验室测得的构成 ds 的材料之波谱特征，故为 λ 的函数。

(2) f_{brd}的数学模型：

$$f_{brd}=\frac{1}{\pi}\cdot\frac{\int_{A_{i1}}\int G\cdot\cos\theta_i\cdot\cos\theta_r\mathrm{d}s+\int_{A_{i1}}\int C\cdot\langle s,i\rangle\langle s,r\rangle\mathrm{d}s}{A\cdot\cos\theta_i\cdot\cos\theta_r}=\frac{1}{\pi}\left[\frac{A_{G11}}{A}G+C\frac{1}{A}\int_{A_{11}}\int\frac{\langle s,i\rangle}{\cos\theta_i}\cdot\frac{\langle s,r\rangle}{\cos\theta_r}\mathrm{d}s\right]$$

式中，A_{G11}为既被照到又被看到的地面面积；A_{C11}为既被照到又被看到的椎面对应的水平面总面积；$\frac{\langle s,i\rangle}{\cos\theta_i}\cdot \mathrm{d}s$为ds沿$i$方向投影到地面的面积，$\frac{\langle s,r\rangle}{\cos\theta_r}$与此相似。

植被介质的多组分多层微波后向散射模型

Chuah H T, Tan H S：植被介质的多组分多层微波后向散射模型. Remote Sensing of Environment, 1990, 31

(1) 基于介电质混合理论，散射体的相对介电常数可表示为：

$$\varepsilon_r=\left[\frac{f_m}{2}\mathrm{Re}(\varepsilon_w)+1.5\right]-j\left[\frac{f_m}{3}\mathrm{Im}(\varepsilon_w)\right]$$

式中，f_m是湿重下的植物水分百分比；$\varepsilon_w=5+\frac{7.5}{1+j(1.85/\lambda)}$为水的介电常数，是波长(cm)。

I_{ndv}相对于像素内变化的变化率计算公式

Jasinski M F：归一化差植被指数对像素内冠层覆盖，土壤漫反射率，及像素尺度的灵敏度 Remote Sensing of Environment, 1990, 32

$$\frac{\partial I_{ndv}}{\partial f^*}=\frac{2[R(\lambda_{RED})\partial R(\lambda_{IR})/\partial f^*-R(\lambda_{IR})\partial R(\lambda_{RED})/\partial f^*]}{[R(\lambda_{IR})+R(\lambda_{RED})]^2}$$

式中，f^*是任意模型参数；$R(\lambda,x)$是以x为中心的像素内覆盖的平均体积反射系数。

玉米光谱-生物物理学数据的多地点分析模型

Wiegand G L, Gerbermann A H, Gallo K P et al：玉米光谱-生物物理学数据的多地点分析 Remote Sensing of Environment, 1990, 33

(1) SAS非线性方法和模型形式：

$$Y=C_i\{1-A_i\exp[-B_i(X)]\}$$

式中，Y是PAR吸收比例，或4个植被指数I_{gv}、I_{pv}、I_{ndv}和I_{rv}中任意一个；X是绿色叶面积指数；C_i是在较大的L值时'Y'的渐近极限值；A_i是透射系数，当'Y'是R_{fpa}时，$L=0$，当'Y'是I_{ndv}时，I_{ndv}取值为1减去裸地的I_{ndv}值；B_i是相应波段的吸收-散射系数，其依赖于叶的方位角分布及太阳顶角；i是区分标志。

(2) 根据在多地点进行的玉米实验，得到：

$$R_{fpa}=1-\exp[-0.400(L_Z)]$$

$$r^2=0.954,\ R_{SME}=0.042,$$

式中，$L_Z=L/\cos Z$，Z是太阳顶角。

$$R_{fpa}=0.0088+0.0315(I_{pv},I_{gv})$$

$$r^2=0.937,\ R_{MSE}=0.070$$

$$R_{fpa}=-0.0488-1.525(I_{ndv})$$

$$r^2=0.889,\ R_{MSE}=0.092$$

(3) 玉米的叶片质量(m_l)与L的关系为：

$$L=0.011+0.018(m_l)-0.000014(m_l)^2$$

$$R^2=0.959,\ R_{MSE}=0.29$$

反射光的偏振度模型

Kharuk V I, Yegorov V V：植物胁迫的偏振指征. Remote Sensing of Environment, 1990, 33

反射光的偏振度可用下面的比例值来度量：

$$P=\frac{R_\perp-R_\parallel}{R_\perp+R_\parallel}$$

式中，$R_\perp$基准面法向方向的谱亮度；$R_\parallel$是平行于基准面的谱亮度。

叶的光学特性谱PROSPECT模型

Jacquemoud S, Baret F：叶的光学特性谱PROSPECT模型. Remote Sensing of Environment, 1990, 34

(1) PROSPECT模型：

对给定波长，反射系数ρ_α和透射系数τ_α的一般公式为：

$$\rho_\alpha=[1-t_{av}(\alpha,n)]+\frac{t_{av}(90,n)t_{av}(\alpha,n)\theta^2[n^2-t_{av}(90,n)]}{n^4-\theta^2[n^2-t_{av}(90,n)]^2}$$

$$\tau_\alpha=\frac{t_{av}(90,n)t_{av}(\alpha,n)\theta n^2}{n^4-\theta^2[n^2-t_{av}(90,n)]^2}$$

式中，α 是最大入射角；n 是折射指数；θ 是盘的传输系数；$t_{av}(\alpha,n)$ 是介电质平面对所有入射方向及偏振方向取平均的透射率。

N 层介质的总的反射系数和透射系数可表示为：

$$R_{N,\alpha}=\rho_\alpha+\frac{\tau_\alpha\tau_{90}R_{N-1,90}}{1-\rho_{90}R_{N-1,90}}$$

$$T_{N,\alpha}=\frac{\tau_\alpha T_{N-1,90}}{1-\rho_{90}R_{N-1,90}}$$

(2) 叶物质的光学常数的确定模型：

折射指数 n 可通过解下面的方程来得到：

$$[\tau_e^2-[\rho_e-1+t_{av}(59,n)]^2][n^2-t_{av}(90,n)]-t_{av}(90,n)t_{av}(59,n)[\rho_e-1+t_{av}(59,n)]=0$$

式中，对均匀介质层应用了盘模型，反射系数 $\rho_e=R_{1,\alpha}$；透射系数 $\tau_e=T_{1,\alpha}$。

盘模型给出了一个传输系数 θ，其通过下面的方程与吸收系数 k 联系起来：

$$\theta-(1-k)e^{-k}-k^2\int_k^\infty x^{-1}e^{-x}\mathrm{d}x=0$$

谱吸收系数 $k(\lambda)$ 可表示为：

$$k(\lambda)=\sum K_i(\lambda)C_i+k_e(\lambda)$$

式中，λ 是波长；$K_i(\lambda)$ 是与叶成分 i 相应的特定的谱吸收系数；C_i 是单位叶面积成分 i 的含量；$k_e(\lambda)$ 可取 $(\rho_e-\rho_{59})^2+(\tau_e-\tau_{59})^2$ 的最小值得到。

辐射亮度温度模型

金亚秋，张俊荣，赵仁宇：多频段微波辐射计对土壤温度的遥感和理论计算。环境遥感，1990，5(3)

$$T_{B\alpha}(\theta)=\int_{-\infty}^{0}\mathrm{d}zT(z)F_\alpha(z,\theta,v)$$

式中，$T(z)$ 为土壤中温度分布廓线；F_α 为 α 极化的权重函数，它是深度 z，θ 和频率 v 的函数；$\alpha=v$ 和 h 分别表示垂直和水平极化。

通过谱分解技术对土壤生物物理特性的估算模型

Huete A R, Escadafal R：通过谱分解技术对土壤的生物物理特性的估计。Remote Sensing of Environment, 1991, 35

(1) 土壤的谱响应等于单一土壤反射性质的加权求和：

$$d_{i,k}=\sum_{j=1}^{n}r_{i,j}c_{j,k}$$

式中，$d_{i,k}$ 是 k 类土壤在波段 i 的测量响应；n 是各种土壤的单一谱特性的数目；$r_{i,j}$ 是特性 j 在波段 i 的响应；$c_{j,k}$ 是特性 j 对 k 类土壤的响应的贡献。

上式可表示为矩阵形式：

$$[\boldsymbol{D}]=[\boldsymbol{R}][\boldsymbol{C}]$$

式中，$\boldsymbol{D}$ 是实验数据矩阵；$\boldsymbol{R}$ 是独立的“基础”谱曲线的响应矩阵或特征谱矩阵；$\boldsymbol{C}$ 是由每个“基础”谱曲线对实验数据的贡献所组成的特征矢量矩阵。

(2) 主成分分析首先是把数据矩阵 $\boldsymbol{D}$ 分解为抽象的特征谱矩阵 $\boldsymbol{R}_A$ 和抽象的特征矢量矩阵 $\boldsymbol{C}_A$；这可通过求解下面的特征根问题得到：

$$[\boldsymbol{Z}]_0[\boldsymbol{C}]_A=[\lambda][\boldsymbol{C}]_A$$

式中，Z 是没有经过处理的原始矩阵的对称协方差($\boldsymbol{Z}_0=\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}$)；$\lambda$ 是特征值的对角矩阵，抽象特征谱矩阵的构成方式为 $[\boldsymbol{R}]_A=[\boldsymbol{D}][\boldsymbol{C}]_A^{\mathrm{T}}$，对正交矩阵，$\boldsymbol{C}^{-1}=\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}$。

水分位势和相对水分含量的分析模型

Riggs G A, Running S W：用机载成像光谱仪探测针叶林冠层的水分胁迫。Remote Sensing of Environment, 1991, 35

植物水分状况的两个重要的生态学量值是叶或根的水分位势(ψ)和相对水分含量(C_{rw})：

$$C_{rw}=\frac{\text{采集重量}-\text{烘干重量}}{\text{含水重量}-\text{脱水重量}}\times100$$

$$\psi_{\mathrm{leaf}}=\psi_{\mathrm{soil}}-(D_{\mathrm{vp}}/R_{\mathrm{leaf}})(R_{\mathrm{sl}})$$

式中，ψ_{leaf} 是叶的水分位势(MPa)；ψ_{soil} 是土壤的水分位势(MPa)；D_{vp} 是水蒸气压亏值(MPa)；R_{leaf} 是叶阻尼($\mathrm{s\cdot m^{-1}}$)；R_{sl} 是土壤到叶的阻尼($\mathrm{s\cdot m^{-1}}$)。

均一分布的草叶层的后向散射模型

Bakhtiari S, Zoughi R：高枝草冠层在微波频段的后向散射特性的模型。Remote Sensing of Environment, 1991, 36

(1) 植被总的雷达波横截面(RCS)的计算而通过对 N 个独立的散射体的总的后向散射横截面的修正得到：

$$\sigma_v(\theta)=\left|\sum_{n=1}^{N}\sqrt{\sigma(\theta,\alpha_n,\beta_n,\gamma_n)}e^{d_n'(jk_0-\alpha_0)}\right|^2$$

式中，$\sigma(\theta,\alpha_n,\beta_n,\gamma_n)$ 是第 n 个散射单元的 RCS，其入射角为 θ、方位任意$(\alpha_n,\beta_n,\gamma_n)$；$d_n'$ 是第 n 个散射单元与第 1 个之间的相差；α_0 是单个草叶的衰减系数。

(2) 冠层总的后向散射系数为：

$$\sigma_{\mathrm{can}}^{0}(\theta)=\sigma_{\mathrm{v}}^{0}(\theta)+\frac{\sigma_{s}^{0}(\theta)}{L^{2}(\theta)}$$

式中，σ_{v}^{0} 是植被体积后向散射系数；σ_{s}^{0} 是土壤表面后向散射系数；L^{-2} 是草冠层对信号的双向衰减系数。

稻谷产量的回归方程

Shibayama M, Akiyama T：利用高光谱分辨率的反射系数值估计成熟期水稻的产量. Remote Sensing of Environment, 1991, 36

$$Y=b_0+b_1X_1-b_2X_2+b_3X_3+\cdots+b_iX_i+e$$

式中，Y 是稻谷产量；X_i 是平滑后的光谱反射系数或归一化差植被指数值；b_i 是回归参数；e 是误差项。

槭衰老指数模型

Yuan X P, King D, Vlcek J：基于多谱段航空摄制影像的谱分析及纹理分析对糖槭的衰老评估. Remote Sensing of Environment, 1991, 37

$$I_{\mathrm{vd}}=a_1+a_2S_{\mathrm{d}}+a_3T_{\mathrm{d}}$$

式中，I_{vd} 是一棵样本树的影像衰老指数；S_{d} 是样本树与参考(健康)树的谱距离；T_{d} 是样本树与参考(健康)树的纹理距离；a_1、a_2 和 a_3 是回归系数。

利用 NOAA-11 AVHRR 波段 4 和 5 对地表温度的大气校正模型

Sobrino J A, Coll C, Caselles V：利用 NOAA-11 AVHRR 波段 4 和 5 对地表温度的大气校正. Remote Sensing of Environment, 1991, 38

(1) 分离窗方程：

$$T_0=T_1+A(T_1-T_2)+B$$

式中，T_0 是真实表面温度；T_1 和 T_2 分别是波段 1 和 2 的辐射温度；A 和 B 是模型系数。

$$A=\frac{\alpha_2\beta_1+\beta_1\beta_2W}{Q}$$

$$B=\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1}\frac{\alpha_1\beta_2}{Q}(1-2k_1W)L_1-\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2}\frac{\alpha_2\beta_1}{Q}(1-2k_2W)L_2$$

式中，$\alpha_i=\varepsilon_i\tau_i\cos\theta$；$\beta_i=k_i[1+2\tau_i(1-\varepsilon_i)\cos\theta]$，$Q=\alpha_1\beta_2-\alpha_2\beta_1$；$\tau_i$ 是透射率；k_i 是回归参数；W 是大气中总的水蒸气量；ε_i 是在波段 i 的表面发射率；L_i 是参数。

(2) 农作物温度：

$$T_V=T_4+A(T_4-T_5)+C$$

式中，C 分离窗口系数。

理论模式均匀双层介质的亮温模型

胡学伟，赵猷，刘宝江等：水面油膜微波辐射特性的研究. 环境遥感，1991，6(2)

$$T_{Bh}(\theta)=\frac{k_0}{\cos\theta}\frac{\varepsilon_1''}{\varepsilon_0}T_1\frac{1}{2k_{1z}''}\times\left[\left|\frac{X_{01}}{D_2}\right|^2\left(1-e^{-2k_{1z}''d}\right)\left(1+|R_{12}|^2e^{-2k_{1z}''d}\right)\right]+\frac{k_0}{\cos\theta}\frac{\varepsilon_2''}{\varepsilon_0}T_2\frac{1}{2k_{2z}''}\left|\frac{X_{01}X_{12}}{D_2}\right|^2e^{-2k_{1z}''d}$$

$$T_{Bv}(\theta)=\frac{k_0}{\cos\theta}\frac{\varepsilon_1''}{\varepsilon_0}T_1\frac{1}{2k_{1z}''}\times\left[\left|\frac{k_0Y_{01}}{k_1F_2}\right|^2\left(1-e^{-2k_{1z}''d}\right)\left(1+|S_{12}|^2e^{-2k_{1z}''d}\right)\right]+\frac{k_0}{\cos\theta}\frac{\varepsilon_2''}{\varepsilon_0}T_2\frac{1}{2k_{2z}''}\left|\frac{k_0Y_{01}Y_{12}}{k_2F_2}\right|^2e^{-2k_{1z}''d}$$

地物光谱波形分析模型

陈宁，徐振兴，崔承禹：蚀变岩石和矿物光谱的切比雪夫比例函数波形分析. 环境遥感，1991，6(4)

(1) 用切比雪夫正交多项式生成连续函数来拟合非连续实测光谱的表达式：

$$f(x)=\sum_{i=1}^{N}T_i(x)a(i)+s(x)$$

式中，$f(x)$ 为被拟合光谱在 x 点的取值；$s(x)$ 为拟合误差；$T_i(x)$ 为第 i 级切比雪夫多项式，其系数 $a(i)=\frac{1}{\pi}\int\left(1-x^2\right)^{-1/2}\cdot f(x)\cdot T_i(x)\mathrm{d}x\quad |x|<1$。

(2) 4 个归一化函数直方图矩阵：

矩阵Ⅰ：

$$F(2i-1,2j,k)=\left[\frac{a(2i-1)}{a(2j)}\right]_k$$

$(i=1, 2, \cdots, 5;\ j=0, 1, \cdots, 4;\ k=1, 2, \cdots, 4) \quad i>j$

矩阵Ⅱ：

$$F(2i,2j-1,k)=\left[\frac{a(2i)}{a(2j-1)}\right]_k$$

$(i=1, 2, \cdots, 5;\ j=1, 2, \cdots, 5;\ k=1, 2, \cdots, 4) \quad i>j$

矩阵Ⅲ：

$$F(2i,2j,k)=\left[\frac{a(2i)}{a(2j)}\right]_k$$

$(i=1, 2, \cdots, 5;\ j=0, 1, \cdots, 4;\ k=1, 2, \cdots, 4) \quad i>j$

矩阵Ⅳ：

$$F(2i+1,2j-1,k)=\left[\frac{a(2i+1)}{a(2j-1)}\right]_k$$

$(i=1, 2, \cdots, 4;\ j=1, 2, \cdots, 4;\ k=1, 2, \cdots, 4) \quad i>j$

辐射量及植物量的光谱估计模型

Daughtry C S T, Gallo K P, Goward S N et al：玉米和大豆冠层的吸收的辐射量及植物量的光谱估计. Remote Sensing of Environment, 1992, 39

(1) 表示为吸收的 PAR 函数的植物量的产出(M)的简单模型为：

$$M=\int_{t_1}^{t_2}\varepsilon f I_0 \mathrm{d}t$$

式中，ε 是辐射利用效率；表示为每单位吸收的 PAR 的干物质的产出($\mathrm{g \cdot MJ^{-1}}$)；f 是入射的光合作用有效辐射的吸收比例；I_0 是入射的光合作用有效的辐射能量($\mathrm{MJ \cdot d^{-1}}$)。

(2) 冠层吸收的 PAR(A_{PAR})可通过下面的公式计算：

$$A_{\mathrm{PAR}}=(I_0+R_s)-(T_c+R_c)$$

式中，R_s 是土壤反射 PAR 的通量密度；T_c 是透射过冠层的 PAR 通量密度；R_c 是从冠层逃离的 PAR 通量密度(包括被土壤反射回来但在到达冠层顶部时仍未被吸收的 PAR)。

反射谱的比值分析(RARS)模型

Chappelle E W, Kim M S, McMurtrey Ⅲ J E：反射谱的比值分析(RARS)：大豆叶中叶绿素 A，B 及类胡萝卜素浓度的遥感估计算法. Remote Sensing of Environment, 1992, 39

榨取色素中各种成分的浓度可根据在 664 nm, 648 nm 和 470 nm 各波段的吸收率，利用下面的公式计算：

$$a_c=12.25A_{664\mathrm{nm}}-2.79A_{648\mathrm{nm}}$$
$$b_c=21.50A_{648\mathrm{nm}}-5.10A_{664\mathrm{nm}}$$
$$s_c=(1000A_{470\mathrm{nm}}-1.82\mathrm{chl}a_c-85.02\mathrm{chl}b_c)/198$$

式中，A 是吸收率。

空间属性提取算法的相关模型

Gong P, Marceau D J, Howarth P J：SPOT HRV 数据用于土地利用分类的空间属性提取算法比较. Remote Sensing of Environment, 1992, 40

1. 灰度值协发性矩阵方法(Gray level coccurrence matrix approach)

角二阶矩：

$$ASM=\sum_{i=1}^{N_g}\sum_{j=1}^{N_g}(P_{ij})^2$$

对比度：

$$CON=\sum_{i=1}^{N_g}\sum_{j=1}^{N_g}(i-j)^2\times P_{ij}$$

相关关系：

$$COR=\sum_{i=1}^{N_g}\sum_{j=1}^{N_g}\frac{(i-\mu)(j-\mu)P_{ij}}{\sigma^2}$$

式中，P_{ij} 表示协发性矩阵的元素(i,j)；N_g 相应于图像的阶度数；$\mu=\sum_{i=1}^{N_g}\sum_{j=1}^{N_g}i\cdot P_{ij}$；$\sigma^2=\sum_{i=1}^{N_g}\sum_{j=1}^{N_g}(i-\mu)^2\cdot P_{ij}$。

2. 统计转换

在这个研究中引入了两个空间测度值：平均灰度值(AVE)和标准偏差(STD)，另外，熵测度(ENT)也被引入：

$$AVE=\frac{1}{W}\sum_{i=0}^{N_g}i\cdot f_i$$

$$STD=\left[\frac{1}{W}\sum_{i=0}^{N_g}(i-AVE)^2\cdot f_i\right]^{1/2}$$

$$ENT=-\sum_{i=0}^{N_g}\left(\frac{f_i}{W}\right)\ln\left(\frac{f_i}{W}\right)$$

式中，f_i 是在一个像素窗内灰度值 i 出现的频率；W 是一个像素窗内像素的总数。

3. 纹理谱方法

纹理谱是从原始的，由3×3像素窗构成的纹理单元提取出来的。令 e_s 表示中心像素的灰度与其周围像素值 s 的逻辑关系：

$$e_s=\begin{cases}0 & (x_c < x_s)\\ 1 & (x_c > x_s)\end{cases}\quad s=1,2,\cdots,8$$

式中，x_c 和 x_s 分别是中心像素与周围像素，由此得到 8 个二进制数 e_s，把它们以某种特定的顺序排列，作为一个集合的一个元素，这个集合就叫作这个像素窗的纹理单元(TU)。

在一个像素窗内，作出关于 TU 数的频率图，即是 TU 的柱状图，这个柱状图即是这个像素窗的纹理谱

SOILSPECT 模型

Jacquemoud S, Baret F, Hanocq J F：土壤的双向反射及谱的建模．Remote Sensing of Environment, 1992, 41

SOILSPECT 是从 Hapke 模型推导出的一个辐射传输模型，考虑的是一个位于 z=0 的平面，其包含无规分布及随机取向的颗粒。这个介质在方向 (i,ϕ) 上受到光强度为 J 的照射、观察探测器的方向为 $(e,0)$，相角描述了入射光与出射光的夹角，探测器接收到的辐射 I 可表示为：

$$I=\frac{J\omega}{4\pi}\frac{\cos i}{\cos i+\cos e}\{[1+B(g)]P(g)+H(\cos i)H(\cos e)-1\}$$

式中，$B(g)=\dfrac{1}{1+(1/h)\tan(g/2)}$；$H(x)=\dfrac{1+2x}{1+2\sqrt{1-\omega x}}$；$\omega$ 是单散射漫反射率(即散射能量与颗粒散射和吸收的总的能量的比)；$P(g)$ 是相函数；$B(g)$ 是 Hapke 引入的后向散射函数，其相角 g 与粗糙度参数 h 与介质的孔隙率相关。

光谱-生物物理学数据的多地点分析模型

Richardson A J, Wiegand C L, Wanjura D F et al：对 Sorghum 的光谱-生物物理学数据的多地点分析．Remote Sensing of Environment, 1992, 41

(1) 对分别处于叶面积指数最大值前和后的 sorghum 的生长期阶段、归一化差异指数(I_{rv})的线性回归方程为：

$$L(\text{pre}-L_{\max})=-0.171+0.459(I_{rv})\qquad r^2=0.74$$

$$L(\text{post}-L_{\max})=-0.135+0.543(I_{rv})\qquad r^2=0.77$$

式中，L 是生长期中最大值前和后阶段的叶面积指数。

(2) 对正交植被指数(PVI)、线性回归方程为：

$$L(\text{pre}-L_{\max})=-0.389+0.214(I_{pv})\qquad r^2=0.81$$

$$L(\text{post}-L_{\max})=-0.069+0.205(I_{pv})\qquad r^2=0.74$$

对红光和近红外辐射的反射率 R，有

$$R=R_v-(R_v-R_g)\exp(-kL)$$

式中，R_v 是植被冠层的反射率的渐近极限值；R_g 是裸地的反射率；k 是冠层的吸收-散射系数。

波段 6 的假定发射模型

Hook S J, Gabell A R, Green A A et al：从地质研究的热红外数据中获取发射率信息的方法比较．Remote Sensing of Environment, 1992, 42

这个方法先假定在波段 6 的波长范围内，地面上每一点的发射率等于一个常数，由于给定波段的发射率的已知，则温度 T 可根据下式得到：

$$T=\frac{C_2}{\lambda_6\ln(\varepsilon_6C_1/L_6\lambda_6^5\pi+1)}$$

式中，T 为温度值，可用来获取波段 1~5 的相应的发射率。

农作物植被层的平均介电常数

金亚秋，张俊荣，赵仁宇：多频段微波辐射计对农作物热辐射的遥感和分层随机介质辐射传输的数值模拟．环境遥感，1992, 7(2)

$$\varepsilon_m=\varepsilon_0+\frac{1}{3}f_v(\varepsilon_v-\varepsilon_0)\sum_{i=1}^{3}\left[\frac{1}{1+A_i(\varepsilon_v/\varepsilon_0-1)}\right]$$

式中，$A_3=\dfrac{1-e^2}{2e^3}\left[\ln\left(\dfrac{1+e}{1-e}\right)-2e\right]$，$A_1=A_2=(1-A_3)/2$，$f_v$ 为植被材料在植被层中的体积占空比；$e=\begin{cases}\left[1-(l_p/l_z)^2\right]^{1/2} & (l_p<l_z)\\ \left[1-(l_z/l_p)^2\right]^{1/2} & (l_p>l_z)\end{cases}$。

多光谱数据与地面光谱数据之间的相关模型

郎爱军：航空多光谱数据与地面光谱数据之间相关性研究．环境遥感，1992, 7(3)

(1) 传感器各波段总响应 R_{ij} 与地物有效反射亮度 W_{ij} 的线性关系模型：

$$W_{ij}=a_i+b_iR_{ij}$$

式中，a_i 为假定空中读数为零时，所对应的地面有效

反射亮度；b_i 为空中读数的单位变化所对应的地面有效反射亮度的变化。

(2) 波段反射率模型：

$$\overline{\overline{\rho}}_{ij}=\frac{W_{ij}}{W_{iL}}\bigg|_{\text{同样入射和测量条件}}$$

式中，W_{ij} 同上；W_{iL} 为理想朗伯体对应的各波段反射亮度。

光谱波形分析法的数学原理

李旭文：光谱遥感数据波形分析法的应用 环境遥感，1992，7(3)

光谱函数的傅里叶级数逼近式：

$$\gamma(x)=\frac{1}{2}a_0+\sum_{P=1}^{n}\left[a_P\cos(Px)+b_P\sin(Px)\right]$$

式中，$a_P=\dfrac{2}{2n+1}\sum_{i=0}^{2n}\gamma_i\cos\dfrac{2\pi ip}{2n+1}$；

$$b_P=\frac{2}{2n+1}\sum_{i=0}^{2n}\gamma_i\sin\frac{2\pi ip}{2n+1}。$$

无云的大气-海洋系统反射率解析模型

Bréon F M：无云的大气-海洋系统反射率解析模型 Remote Sensing of Environment，1993，43

气溶胶光学厚度随光谱的变化：

$$\tau_{\text{aer}\lambda}\approx\tau_{\text{aer500}}(\lambda/500)^{-\gamma}$$

式中，τ_{aer500} 是在波长为 500nm 时的气溶胶光学厚度；γ 是 Ångström 指数；λ 是波长。

谱混合分析模型

Mertes L A K, Smith M O, Adams J B：从 Landsat 图像估计亚马逊河湿地的地表水中悬浮泥沙浓度。Remote Sensing of Environment，1993，43

对多谱段图像，谱的端元表示了每个成分的纯样本，从这些图像端元出发，可以对每个像素在每个谱段在方差最小的条件下进行拟合：

$$DN_b=\sum_{i=1}^{N}F_iDN_{i,b}+E_b$$

式中，DN_b 是某个像素在波段 b 的辐射的数位表示；F_i 是端元 i 的比例；$DN_{i,b}$ 是端元 i 在波段 b 的数位表示的辐射；N 是端元数量；E_b 是 N 个端元在波段 b 的拟合误差。

通过计算误差的均方根可对混合模型进行拟合检验。

$$\varepsilon=N^{-1}\sum_{b=1}^{N}E_b^2$$

用 AVHRR 数据确定地表温度和发射率的可行性论证模型

Li Z L, Becker F：从 AVHRR 数据确定地表温度和发射率的可行性 Remote Sensing of Environment，1993，43

(1) 基于辐射测量的地表温度定义为：

$$T_s=B_i^{-1}\left[\frac{R_i-(1-\varepsilon_i)R_{\text{ati}\downarrow}}{\varepsilon_i}\right]$$

式中，$B_i(T)$ 是温度为在波段 i 的表面亮度温度 T 的黑体在波段 i 的辐射函数；B_i^{-1} 是 $B_i(T)$ 的反函数；ε_i 是非均匀像素的发射率；R_i 是地面辐射，$R_{\text{ati}\downarrow}$ 是在波段 i 的上行大气辐射。

(2) 温度无关谱指数(I_{tis})定义为：

对 AVHRR 的夜晚数据，夜晚的定义为：

$$I_{\text{TISn}}=M\frac{B_3(T_{\text{g3n}})}{B_4(T_{\text{g4n}})^{a4}B_5(T_{\text{g5n}})}$$

对白天数据，白天的 I_{TIS} 的计算公式：

$$I_{\text{TISd}}=M\frac{B_3(T_{\text{g3d}})}{B_4(T_{\text{g4d}})^{a4}B_5(T_{\text{g5d}})}$$

式中，T_g 是地面亮度温度；下标 i 代表波段；n 和 d 分别表示夜晚和白天；$a4$ 和 M 是常数。

波段 3 的发射率[$\varepsilon_3(\theta)$]的计算公式：

$$\varepsilon_3(\theta)=1-\frac{\pi(I_{\text{TISd}}-I_{\text{TISn}})B_4(T_{\text{g4d}})^{a4}B_5(T_{\text{g5d}})}{MR_{\text{g3}}^s(\theta_s)\cos\theta_s f_3(\theta_s,\theta)}$$

式中，$R_{\text{g3}}^s(\theta_s)$ 是在波段 3 的太阳光辐射；θ_s 和 θ 分别是太阳的角度和观察的角度；$f_3(\theta_s,\theta)$ 是表面的角度相关因子。

波段 4 和波段 5 的发射率的计算公式：

$$\varepsilon_4=\left(\frac{\varepsilon_3}{I_{\text{TIS54n}}I_{\text{TISn}}}\right)^{1/(n54+a4)}$$

$$\varepsilon_5=\varepsilon_4^{n54}I_{\text{TIS54n}}$$

(3) 表面温度的表达式：

$$T_s = A_0 + P\frac{T_4 + T_5}{2} + M\frac{T_4 - T_5}{2}$$

式中，

$$A_0 = 1.274$$

$$P = 1 + 0.15616\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} - 0.482\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2}$$

$$M = 6.26 + 3.98\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + 38.33\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2}$$

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_4 + \varepsilon_5}{2}, \quad \Delta\varepsilon = \varepsilon_4 - \varepsilon_5$$

式中，T_4和T_5分别是波段4和波段5的亮度温度。

光截留和生物量计算模型

Christensen S, Goudriaan J：从谱反射系数比获取光截留和生物量．Remote Sensing of Environment, 1993, 43

(1) 某个叶片水平生长的农作物对红光(ρ_r)和近红外辐射(ρ_i)的谱反射系数可给为：

$$\rho_r = \frac{\rho_{r,\infty} + (\eta_r / \rho_{r,\infty})\exp(-2K_r L)}{\rho_{r,\infty} + \eta_r \exp(-2K_r L)}$$

式中，

$$\eta_r = \frac{\rho_{r,\infty} - \rho_{r,s}}{\rho_{r,s} - 1/\rho_{r,\infty}}$$

$$\rho_i = \frac{\rho_{i,\infty} + (\eta_i / \rho_{i,\infty})\exp(-2K_i L)}{\rho_{i,\infty} + \eta_i \exp(-2K_i L)}$$

式中，$\eta_i = \dfrac{\rho_{i,\infty} - \rho_{i,s}}{\rho_{i,s} - 1/\rho_{i,\infty}}$；参数$\rho_{r,\infty}$和$\rho_{i,\infty}$分别是高$I_{la}$值时($I_{la}$>8)的反射系数；$\rho_{r,s}$和$\rho_{i,s}$分别是红光和近红外辐射在裸地的反射系数；参数$K_r$和$K_i$是红光和近红外辐射的消光系数。

(2) 相对植被指数(I_{rv})定义为：

$$I_{rv} = \frac{\rho_i}{\rho_r}$$

PROSPECT+SAIL冠层反射模型

Jacquemoud S：根据AVIRIS等价谱对PROSPECT-SAIL冠层反射模型的反演的理论研究．Remote Sensing of Environment, 1993, 44

PROSPECT+SAIL模型的反演即是在整个谱段上使Δ^2最小化的要求下得到参数集($N, C_{ab}, C_w, L_{AI}, \theta_l$)：

$$\Delta^2 = \sum_{i=1}^{224}[R_{mes}(\lambda_i) - R_{mod}(\lambda_i, P)]^2$$

式中，$R_{mes}(\lambda)$是测量值，并用它来模拟的冠层谱反射率；求和是对224个AVIRIS等价谱段(10nm解析度)进行。

空间域内的总能量模型

叶泽田：频谱段图像及其应用的探讨．环境遥感，1993, 8(2)

$$\text{空间域总能量} = \sum_{C_1}\sum|F(u,v)|^2 + \cdots + \sum_{C_n}\sum|F(u,v)|^2$$

式中，$\sum_{C_i}\sum|F(u,v)|^2$反映了频率子域C_i上的能量大小，称为频谱段能量；相应的子域C_i称为频谱段。

方向性孔隙率与日截留效率的计算模型

Bégué A：叶面积指数、截留的光合作用有效辐射及谱植被指数对规则丛生冠层的灵敏度分析．Remote Sensing of Environment, 1994, 46

(1) 丛集的方向性孔隙率[$p(\theta_s)$]方程式：

$$p(\theta_s) = \exp\left[-K_c(\theta_s, \eta, L_{IDF})(1-\tau_L)\frac{\sqrt{3}L}{2\pi R^2}\right]$$

式中，L是叶面积指数；H是高度；R是半径，L_{IDF}是叶倾斜分布函数；τ_L是透射率；θ_s是太阳天顶角；K_c是圆柱体的消光系数；η是形状因子；$\eta = R/H$。

(2) 日截留效率ε_i可通过下式计算：

$$\varepsilon_i = \frac{\int_{t_0}^{t_n}\varepsilon_i' R_{PAO}\mathrm{d}t}{\int_{t_0}^{t_n}R_{PAO}\mathrm{d}t}$$

式中，ε_i'是瞬时截留效率；t_0和t_n分别是太阳升起和降落的时间；R_{PAO}是入射的光合作用有效辐射。

多谱段双向反射模型

Ranson K J, Irons J R, Williams D L：应用ASAS的北部森林冠层的多谱段双向反射．Remote Sensing of Environment, 1994, 47

(1) 表面反射因子(R)表达式：

$$R = f/(1+sf)$$

式中，$f = [(\rho_s/t_g) - \rho_a]/T$；$s$是大气的球漫反射系数；$t_g$是大气层的气体透射率；$\rho_a$是外大气层辐射标准化的路径辐射；$T$是大气层的双路径散射透射率，$\rho_s$是转换标准化辐射。

(2) 百分比反射因子$R_{PAR}(\theta, \varphi)$表达式：

$$R_{PAR}(\theta,\varphi)=a\beta\theta^2-b\theta\cos\varphi+c$$

式中，θ 是相对于太阳基准平面的观察顶角；φ 是观察的方位角；a,b,c 是参数

基于 AVIRIS 观测数据的冠层生物化学估计的多变量分析模型

Johnson L F, Hlavka C A, Peterson D L：基于 AVIRIS 观测数据对沿俄勒冈州横断面的冠层生物化学估计的多变量分析. Remote Sensing of Environment, 1994, 47

（1）根据传感器端的辐射得到的每个波段的反射因子(RF)：

$$RF(\lambda)=[(L_t-L_p)/(L_{ra}-L_p)]a$$

式中，L_t 是在 AVIRIS 传感器端的辐射；L_{ra} 是漫反射系数 $a=0.5$ 时模拟的地表面总的辐射；L_p 是大气层路径辐射。

（2）对每个波段的 RF 简单的一阶微分计算：

$$RF'(\lambda_i)=(RF_i-RF_{i-1})/\Delta\lambda_\mu$$

式中，$RF'(\lambda_i)$ 是波段 i 的一阶微分；RF_i 是波段 i 的 RF；$\Delta\lambda_\mu$ 是波段中心间的取样间距

粗糙表面的非线性混合谱段模型

Borel C C, Gerstl S A W：植被及土壤表面的非线性混合谱段模型. Remote Sensing of Environment, 1994, 47

（1）两面模型(Two-facet model)：
单位面积的平均反射率 $\bar{\rho}$ 给为：

$$\bar{\rho}=f\rho_1+(1-f)\rho_2$$

式中，f 是介质 1 所占的比例；$1-f$ 是介质 2 所占的比例；ρ_1 和 ρ_2 分别是介质 1 和介质 2 的反射率。

（2）对 N 成分模型：

$$\bar{\rho}=\sum_{i=1}^{N}f_i\rho_i$$

式中，$\sum_{i=1}^{N}f_i=1$。

（3）对法向光照和任意观察方向，反射率为：

$$\rho_{radiosity}(\theta_i=0,\varphi_i=0,\theta_r,\varphi_r)=\frac{\bar{\rho}\cos\theta+\bar{\rho}^2(1-\cos\theta)\cos\theta}{1-[\bar{\rho}(1-\cos\theta)]^2}$$

式中，$\rho_{radiosity}$ 是有效辐射导出的反射率。

土壤校正植被指数的修正模型

Chehbouni J Q A, Huete A R, Kerr Y H et al：土壤校正植被指数的修正. Remote Sensing of Environment, 1994, 48

（1）具有自调整性的 L 函数：

$$L=1-2\gamma\, I_{NDV}I_{WDV}$$

式中，L 是为了降低土壤的背景效应引入的土壤校正因子；I_{NDV} 是标准差植被指数；I_{WDV} 是加权差植被指数；γ 是基本土壤线参数。

（2）修正的土壤校正植被指数(I_{MSAV})可表示为：

$$I_{MSAV}=\frac{\rho_{NIR}-\rho_{red}}{\rho_{NIR}+\rho_{red}+L}(1+L)$$

式中，ρ 是近红外波段或红光波段的反射率，下标 1 用于区别这里的 I_{MSAV} 的公式与进一步归纳出 I_{MSAV} 公式

（3）为了使土壤的效应最小化，利用归纳法得到土壤校正植被指数另一形式：

$$I_{MSAV_1}=\frac{-b-\sqrt{b^2-4c}}{2}$$

式中，$b=-(2\rho_{NIR}+1)$；$c=2(\rho_{NIR}-\rho_{red})$

冠层反射率对叶片反射率的敏感度计算公式

Baret F, Vanderbilt V C, Steven M D et al：利用诸类比方法估计冠层反射率对叶光学特性的敏感度. Remote Sensing of Environment, 1994, 48

$$\frac{\partial\rho_c}{\partial\rho_l}=\frac{\partial\rho_c}{\partial\lambda}\left(\frac{d\rho_l}{d\lambda}\right)^{-1}$$

式中，λ 是波长，冠层反射率对叶片光学特性的敏感度可以通过对冠层和叶的同时观测来估计。

植被指数/温度(VIT)梯形模型

Moran M S, Clarke T R, Inoue Y et al：利用表面-空气温度与诸植被指数的关系估计农作物水分的差额. Remote Sensing of Environment, 1994, 49

（1）对完全覆盖、水分充足的植被：

$$(T_s-T_a)_1=[r_a(R_n-G)/C_v]\times\{\gamma(1+r_{cp}/r_a)/[\Delta+\gamma(1+r_{cp}/r_a)]\}-\{V_{PD}/[\Delta+\gamma(1+r_{cp}/r_a)]\}$$

（2）对完全覆盖，但水分缺乏的植被：

$$(T_s-T_a)_2-[r_a(R_n-G)/C_v]\times \{\gamma(1+r_{cx}/r_a)/[\Delta+\gamma(1+r_{cx}/r_a)]\}-\{V_{PD}/[\Delta+\gamma(1+r_{cx}/r_a)]\}$$

(3) 对水分饱和的裸地，这里冠层阻力 $r_c=0$：

$$(T_s-T_a)_3=[r_a(R_n-G)/C_v]\times[\gamma/(\Delta+\gamma)]-[V_{PD}/(\Delta+\gamma)]$$

(4) 对干燥裸地，$r_c=\infty$(等价于气孔完全关闭)：

$$(T_s-T_a)_4=[r_a(R_n-G)/C_v]$$

式中，c_v 为空气的体积热容量；Δ 为饱和水蒸气压与温度曲线的斜率；γ 为湿度计常数；G 为土壤热通量密度；H 为显热通量密度；r_a 为空气动力学阻力；r_{cx} 为最大冠层阻力，与气孔近完全关闭相关；r_{cp} 为处于潜在蒸发蒸腾率时冠层阻力；R_n 为净辐射热通量密度；T_a 为空气温度；T_s 为表面复合温度(农作物叶面温度与土壤表面温度的加权平均)；V_{DP} 为空气温度为 $(T_c+T_a)/2$ 时水蒸气的压差；

(5) 水分差额指数(W_{DI})可表示为：

$$W_{DI}=\frac{(T_s-T_a)_m-(T_s-T_a)_r}{(T_s-T_a)_x}$$

式中，下标 m，x 和 r 分别对应最小值、最大值和实测值。

多谱段卫星观察的协作模型

Choudhury B J：区域土地表面蒸发估计的多谱段卫星观察的协作　Remote Sensing of Environment，1994，49

(1) 红外温度(T_s)与可见光反射率(ρ_s)的相关性：

$$T_s=a+b\rho_s$$

式中，$a=(T_v\rho_b-T_b\rho_v)/(\rho_b-\rho_v)$；$b=(T_b-T_v)/(\rho_b-\rho_v)$；$T_b$ 和 T_v 分别是裸地及植被的温度；ρ_b 和 ρ_v 分别是裸地及植被的反射率。

(2) T_s 与 I_V 的相关性：

$$T_s=A+BI_V$$

$$A=T_a+\left(R_n+\frac{\lambda E_p\cdot I_{V\min}-0.4R_n\cdot I_{V\max}}{I_{V\max}-I_{V\min}}\right)\frac{r_H}{\rho c_p}$$

$$B=\left(\frac{\lambda E_p-0.4R_n}{I_{V\max}-I_{V\min}}\right)\frac{r_H}{\rho c_p}$$

式中，R_n 是净辐射率；E_p 是潜在蒸发率；T_a 是在参考点空气的测量温度(通常取观察点冠层上方 1.5m 处为参考点)；λ 是蒸发潜热；ρ 是密度；c_p 是空气的定压热容量；r_H 是显热交换的阻力。

农作物参数估计模型

Clevers J G P W, Büker C, Leeuwen H J C：直接和光谱遥感信息结合监测农作物生长的框架方案　Remote Sensing of Environment，1994，50

Clevers (1988；1989)提出了一个简化的、半经验性的反射模型用以估计绿色植物冠层的叶面积指数(LAI)。首先，权重差植被指数(I_{wdv})被确定以修正土壤背景：

$$I_{wdv}=r_{ir}-C\cdot r_r$$

式中，r_{ir} 为近红外(NIR)反射的总测量值；r_r 为红光反射的总测量值；$C=r_{s,ir}/r_{s,r}$（$r_{s,ir}$ = 土壤的 NIR 反射，$r_{s,r}$ = 土壤的红光反射)。

$$I_{la}=-1/\alpha\cdot\ln(1-I_{wdv}/I_{wdv\infty})$$

式中，α 和 $I_{wdv\infty}$ 是参数。

地球表面热红外遥感观测的信息提取算法

Norman J M, Divakarla M, Goel N S：地球表面热红外遥感观测的信息提取算法。Remote Sensing of Environment，1995，51

1. 表面温度与表面通量之间的联系

表面温度与表面通量之间的联系可用一个一维表面能量平衡方程来表示：

$$R_n=H+E+G$$

此方程式中，显热通量(H, $W\cdot m^{-2}$)表示为：

$$H=C_a\frac{T_{aero}-T_a}{r_a}$$

蒸散表示为(E, $W\cdot m^{-2}$)：

$$E=C_a\frac{(e_s-e_a)}{\gamma(r_a+r_s)}$$

式中，C_a ($J\cdot m^{-3}\cdot K^{-1}$)是空气的体积热容量；$T_{aero}$ 是表面大气动力学温度；T_a 是冠层上方附近空气温度；r_a ($s\cdot m^{-1}$)是空气动力学阻力；e_s (Pa)是表面温度对应的饱和水蒸气压；e_a (Pa)是冠层上方附近水蒸气压；γ ($Pa\cdot K^{-1}$)是干湿计常数；r_s ($s\cdot m^{-1}$)是水分扩散的表面阻力，其值依赖于 (e_s-e_a)。

表面吸收的净辐射(R_n)是净太阳辐射和净热辐射之和，其表达式为：

$$R_n = R_s(1-a)+(1-\varepsilon)R_{sky}+\varepsilon\sigma T_{sh}^4$$

式中，R_s是入射太阳辐射；a是表面漫反射系数；ε是表面宽频带半球面辐射率；σ是Stefan-Boltzman常数；T_{sh}是表面半球面热红外温度；R_{sky} ($W \cdot m^{-2}$)是天空热辐射；G ($W \cdot m^{-2}$)是土壤热传导通量，其值可估计为净辐射的一部分。

2. 空气动力学与辐射温度之间的联系

空气动力学温度可表示为：

$$T_{aero} = (T_{soil}-T_a)\frac{r_{aero}}{r_{soil}}+(T_{veg}-T_a)\frac{r_{aero}}{r_{veg}}+T_a$$

式中，T_{veg}是植被动力学温度；T_{soil}是土壤-表面动力学温度；T_a是空气温度；r_{soil}是土壤空气动力学阻力；r_{veg}是植被空气动力学阻力；有效空气动力学阻力为$r_{aero}=r_{soil}r_{veg}/(r_{soil}+r_{veg})$。

植被-土壤系统的直接热红外温度[$T_{IR}(\Theta)$]是植被和土壤表面动力学温度以其在视界内各自占的比例的加权平均：

$$T_{IR}(\Theta) = [f_v(\Theta)T_{veg}^n+(1-f_v(\Theta))T_{soil}^n]^{1/n}$$

式中，Θ是传感器的视顶角；n是温度的幂指数；$f_v(\Theta)$是植被在红外传感器的视界中占的比例，对随机冠层或其他非均匀覆盖冠层，其可近似表示为$f_v(\Theta)=1-\exp(-0.5I_{la}/\cos\Theta)$，对8~14 μm波段，$n=4$。

亮度温度[$T_B(\Theta)$]可近似为：

$$T_B(\Theta) \cong [\varepsilon(\Theta)T_{IR}^n+(1-\varepsilon(\Theta))T_{sky}^n]^{1/n}$$

式中，$\varepsilon(\Theta)$是直接辐射率；T_{sky}是天空的半球面亮度温度。

3. 热惯量-可用水分方法

热惯量(P)的量度：

$$P=\sqrt{C_s k_s}$$

可用水分(M or m)根据Price可表示为：

$$E = C_a\frac{me_s-e_a}{\gamma r_a}$$

或根据Carlson表示为：

$$E = C_a\frac{e_s-e_a}{\gamma(r_a+r_v)}M$$

式中，C_s ($J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$)是介质体积热容量；$k_s$ ($J \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$)是介质有效热导率；$r_v$是水蒸气的过阻尼($s \cdot m^{-1}$)。

植被吸收的PAR双向反射估计模型

Roujean J L, Breon F M：通过双向反射测量估计植被吸收的PAR. Remote Sensing of Environment, 1995,51

(1) 重新标准化差异植被指数(I_{rdv})定义为：

$$I_{rdv}=(I_{ndv}I_{dv})^{1/2}=\frac{R_{ni}-R_{vi}}{\sqrt{R_{ni}+R_{vi}}}$$

式中，R_{vi}和R_{ni}分别是可见光与近红外波段的目标反射。

(2) 对反射率ρ_{opt}，如选择后向散射方向$\varphi=0°$及$\theta_s=60°$，$\theta_v=45°$，有：

$$\rho_{opt}=k_0-0.240\times k_1\times 0.202\times k_2$$

对$\varphi=90°$及$\theta_s=\theta_v=60°$，有：

$$\rho_{opt}=k_0-1.401\times k_1+0.091\times k_2$$

(3) I_{rdv}可用下式估计：

$$(I_{rdv})_{opt}=\frac{(\rho_{opt})_{NIR}-(\rho_{opt})_{VIS}}{\sqrt{(\rho_{opt})_{NIR}+(\rho_{opt})_{VIR}}}$$

式中，k_0，k_1和k_2均为依赖于冠层物理特性的参数。

$(I_{rdv})_{opt}-f_{APAR}$的平均关系式为：

$$f_{APAR}=a\cdot(I_{rdv})_{opt}-b$$

式中，a和b是回归系数。

反射波谱线性拟合模型

Gao B C, Goetz A F H：用AVIRIS数据反演等价水厚度及与植被冠层的生物化学成分的相关信息. Remote Sensing of Environment, 1995, 52

假设植被的反射波谱与透射波谱具有同样的形状，反射波谱$R(\lambda)$可表示为：

$$R(\lambda)=(a+b\lambda)\exp\left[-\sum_{i=1}^{n}k_i(\lambda)u_i\right]$$

式中，λ是波长；n模型中端元的总数；$k_i(\lambda)$是第i个端元的吸收系数；u_i是第i个端元的吸收量；a和b是回归系数。

叶面积指数与反射率的关系模型

Price J C, Bausch W C：从可见光及近红外波段反射数据估计叶面积指数. Remote Sensing of Environment, 1995, 52

$$I_{la}=\frac{1}{2c}\ln\left[\frac{(R-1/r_x)(r_s-r_x)}{(R-r_x)(r_s-1/r_x)}\right]$$

式中，I_{la}是叶面积指数；R是反射率；r_s，r_x和c都是波长的函数，c可以从辐射在冠层中的衰减得到，也可以从考虑一个冠层在发育的不同阶段而得。

土壤湿度和表面粗糙度的主动式/被动式微波数据估计模型

Huang X Z, Jin Y Q：应用主动式/被动式微波数据估计土壤湿度和表面粗糙度的一个简单方法. Remote Sensing of Environment 1995, 53

(1) 当粗糙度的水平尺度较大而表面 RMS 坡度小于 0.25 时，表面可能同时产生相干的和非相干的散射，收发分置相应的散射系数为：

$$\gamma_{pq}=\gamma_c+\gamma_{pqn}+\gamma_{pqs},\quad p,q=v,h$$

式中，γ_c是相干散射项；γ_{pqn}是零阶坡度项相应的非相干散射部分；γ_{pqs}是一阶坡度项相应的非相干部分。

(2) 考虑到交互作用，发射率可用下式计算：

$$e_p(\theta)=1-\frac{1}{4\pi\cos\theta}\times\int_0^{2\pi}\mathrm{d}\varphi'\int_0^{\pi/2}\mathrm{d}\theta'\sin\theta'\left[\gamma_{pp}(\theta',\varphi',\theta,\varphi)+\gamma_{pq}(\theta',\varphi'',\theta,\varphi)\right]$$

松毛虫危害的光谱特征与虫害早期探测模式

吴继友，倪健：松毛虫危害的光谱特征与虫害早期探测模式. 环境遥感，1995, 10(4)

(1) 倒置高斯模型：

$$R(\lambda)=R_{sg}-(R_{sg}-R_{og})\exp\left[-\frac{(\lambda-\lambda_{og})^2}{2\sigma^2}\right]$$

式中，R_{og}为红光区最低反射率；R_{sg}为红外肩反射率；λ_{og}为R_{og}对应的波长；σ为模型曲线拐点波长与λ_{og}的差。

(2) 细分光谱特征参量松毛虫害判别模式：

$$P_i=\frac{\exp(f_i-f_a)}{\sum_{i=1}^{5}\exp(f_i-f_a)}$$

式中，P_i为样品属于第i类的后验概率；f_i为判别函数；f_a为其最大值。

植被指数

史培军，潘耀忠，谢涛：晋陕蒙接壤区环境演变及环境动态监测研究. 自然资源，1995, 5

(1) 比值植被指数I_{dv}模型：

$$I_{dv}=\frac{CH_2}{CH_1}$$

式中，CH_2和CH_1分别为第二、第一光谱通道的光谱值。

(2) 归一植被指数I_{ndv}模型：

$$I_{ndv}=\frac{CH_2-CH_1}{CH_2}+CH_1$$

标准化水分差异指数

Gao B C：NDWI-植被液态水的空中遥感的标准化水分差异指数. Remote Sensing of Environment 1996, 58

标准化水分差异指数(I_{ndw})应用了两个近红外波段，一个中心近似在 0.86μm，另一个中心在 1.24μm，其定义为：

$$I_{ndw}=\frac{\rho(0.86\mu m)-\rho(1.24\mu m)}{\rho(0.86\mu m)+\rho(1.24\mu m)}$$

土壤校正植被指数与大气校正指数模型

Rondeaux G, Steven M, Baret F：土壤校正植被指数的优化. Remote Sensing of Environment, 1996, 55

1. 利用土壤性质的指数

土壤校正植被指数(the soil-adjusted vegetation index)：

$$I_{sav}=(1+L)\cdot(R_{ni}-R)/(R_{ni}+R+L)$$

式中，L=0.5。

变形土壤校正植被指数(the transformed soiladjusted vegetation index)：

$$I_{tsav}=\frac{a(R_{ni}-aR-b)}{[R+a(R_{ni}-b)+0.08(1+a^2)]}$$

式中，a 和b分别是土壤的坡度和截留量。

修正土壤校正植被指数(the modified soiladjusted vegetation index)：

$$I_{msav}=(1+L)\cdot(R_{ni}-R)/(R_{ni}+R+L)$$

式中，$L=1-2a\cdot I_{ndv}\cdot I_{wdv}$。

双坐标植被指数(the two-axis vegetation index)：

$$I_{twv}=(1+L)\cdot(R_{ni}-R-\Delta)/(R_{ni}+R+L)$$

式中，$\Delta=\sqrt{2\cdot\exp(-K\cdot I_{la})\cdot D}$，$K$ 是消光系数，$D=(R_{nisoil}-aR_{soil}-b)/(1+a^2)^{1/2}$。

2. 大气校正指数

大气阻尼植被指数(the atmospherically resistant vegetation index)：

$$I_{arv}=(I_{ni}-R_B)/(I_{ni}+R_B)$$

式中，R_B 是蓝光波段与红光波段的组合反射率，

$$R_B=R-\gamma(B-R)$$

式中，γ 依赖于大气悬浮物的类型。

总体环境监测指数(the global environment monitoring index)：

$$I_{gem}=\eta(1-0.25\eta)-(R-0.125)/(1-R)$$

式中，$\eta=[2(R_{ni}^2-R^2)+1.5R_{ni}+0.5R]/(R_{ni}+R+0.5)$，$I_{ndv}$ 是标准植被差异指数，R_{ni} 和 R 分别是近红外与红光波段的反射率。

小麦的雷达信号描述模型

Taconet O, Madjar D V, Emblanch C et al：在利用雷达 C 波段观测值估计土壤湿度中植被效应的计入. Remote Sensing of Environment, 1996, 56

描述小麦的雷达信号的一个简单模型的标准反射散射系数(dB)可表示为：

$$\sigma_0=BM_v+C+Dw_g$$

式中，$B=-20B_1/\lg(\cos 20^\circ)$；$M_v$ 是植物水含量(kg·m^{-2})；w_g 是土壤表面水含量；B，C 和 D 是参数。

混合光谱分析模型

刘政凯，李曙炜：成像光谱遥感图像的有限光谱混合分析. 环境遥感，1996，11(1)

$$DN_b=\sum_{r=1}^{c}R_{br}f_r+E_b$$
$$b=1,1,\cdots,B$$

式中，DN_b 为像素第 b 个波段的灰度值；f_r 为该像素中第 r 类物体所占的比例；R_{br} 为第 r 类物体第 b 个波段的反射值；E_b 为拟合的误差。

KT 变换

赵英时，场忆：全新世海侵痕迹遥感信息特征提取方法研究. 地理研究，1996，15(1)

(1) TM 变换公式：

$$B=b_1\times0.3037+b_2\times0.2793+b_3\times0.4743+b_4\times0.5585+b_5\times0.5082+b_7\times0.1863$$

$$G=b_1\times(-0.2848)+b_2\times(-0.2435)+b_3\times(-0.5436)+b_4\times0.1509+b_5\times0.0840+b_7\times(-0.1800)$$

$$W=b_1\times0.1509+b_2\times0.1973+b_3\times0.3279+b_4\times0.3406+b_5\times(-0.7112)+b_7\times(-0.4572)$$

式中，B 为亮度；G 为绿度；W 为湿度；b_i 为波段数据。

(2) MSS 计算公式：

$$B=b_4\times0.332+b_5\times0.603+b_6\times0.675+b_7\times0.262$$

$$G=b_4\times(-0.283)+b_5\times(-0.660)+b_6\times0.557+b_7\times0.388$$

$$Y=b_4\times(-0.899)+b_5\times0.428+b_6\times0.076+b_7\times0.041$$

$$N=b_4\times(-0.016)+b_5\times0.131+b_6\times(-0.452)+b_7\times0.882$$

式中，Y 为黄度；N 为噪声及遗留的信息。

火灾后生态系统恢复速率的模拟模型

Viedma O, Meliá J, Segarra D et al：利用 Landsat TM 数据模拟火灾后生态系统恢复速率. Remote Sensing of Environment, 1997 6

(1) 用 I_{ndv} 单位时间的变化率(斜率)作为火灾后群落恢复速率的表达式，在这个意义上，高斜率意味着高恢复速率的时期。

$$\frac{dI_{ndv}}{dt}=Y=B\cdot D\cdot e^{-Dt}$$

式中，I_{ndv} 是标准植被差异指数；B 是裸地与极限叶冠间反射率的变化值；D 为回归参数；t 为时间。

(2) 再生率 $Z(t)$ 定义为：

$$Z(t)=\frac{I_{ndv_t}-I_{ndv0}}{I_{ndv\infty}-I_{ndv0}}=1-e^{-Dt}$$

式中，I_{ndv_t} 是考察时间群落的 I_{ndv} 值；$I_{ndv\infty}$ 是 I_{ndv} 的极限值；I_{ndv0} 是 I_{ndv} 在刚发生火灾后的值。

水色与水体成分的吸收和散射的关系模型

唐军武，田国良：水色光谱分析与多成分反演算法. 遥感学报，

1997，1(4)

$$R_{rs}=\frac{ft}{Qn^2}\frac{b_b}{a+b_b}$$

式中，R_{rs} 为遥感反射率；a 为水体的总吸收系数；b_b 为总的后向散射系数；f 为一经验参数，是太阳天顶角的函数；Q 为光场分布参数；t 为水汽界面的透过率；n 为水体的折射率。

水体各成分的后向散射模型

唐军武，田国良：水色光谱分析与多成分反演算法　遥感学报，1997，1(4)

(1) 海水的散射模型：

$$\frac{b_w(\lambda_1)}{b_w(\lambda_2)}=\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-4.3}$$

式中，b_w 为海水的体散射；λ 为波长。

(2) 叶绿素的散射模型：

$$b_c(\lambda)=b_c(550)\cdot\frac{a_c(550)}{a_c(\lambda)}$$

式中，$b_c(\lambda)$ 为叶绿素的体散射；a_c 为单位吸收系数。

(3) 悬浮泥沙的散射模型：

$$\frac{b_s(\lambda_1)}{b_s(\lambda_2)}=\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-n}$$

式中，b_s 为悬浮泥沙的体散射；n 为 0、1 或 2。

在 3.75 μm 波段反射信号的 AVHRR 数据恢复模型

Roger J C, Vermote E F：从 AVHRR 数据恢复在 3.75 μm 波段反射信号的方法　Remote Sensing of Environment，1998，64

(1) AVHRR 波段 3 中表面反射系数的求解

在无云的大气情形及局部热力学平衡的条件下，在热波段 i (3、4、5 是对 AVHRR)测量到大气顶部发出的辐射 R_i^m，视顶角为 θ_v 及视方位角为 φ_v，而太阳坐标为(θ_s,φ_s)。

$$\begin{aligned}&R_i^m(\theta_s,\theta_v,\varphi_s,\varphi_v)=\\&\int f_i(\lambda)\varepsilon_\lambda(\theta_v,\varphi_v)B_\lambda(T_s)\tau_\lambda(\theta_v,\varphi_v)\mathrm{d}\lambda+\\&\iint f_i(\lambda)B_\lambda(T_p)\frac{\delta\tau_\lambda(\theta_v,\varphi_v,p)}{\delta p}\mathrm{d}p\mathrm{d}\lambda+\\&\int f_i(\lambda)\iint K\cos(\theta')\sin(\theta')\mathrm{d}\theta'\mathrm{d}\varphi'\mathrm{d}\lambda\end{aligned}$$

式中，$K=\rho_{b\lambda}(\theta_v,\varphi_v,\theta',\varphi')L_{s\lambda}(\theta',\varphi')\tau_\lambda(\theta_v,\varphi_v)$；

$$L_{s\lambda}(\theta',\varphi')=\int B_\lambda(T_p)\frac{\delta\tau'_\lambda(\theta',p)}{\delta p}\mathrm{d}p+\delta(\varphi_s-\varphi')\delta(\theta_s-\theta')\frac{\cos(\theta_s)E_\lambda^s}{\pi}\tau'_\lambda(\theta_s)$$

；$f_i(\lambda)$ 是辐射仪在波段 i 的谱响应；ε_λ 是表面光谱发射率；$B_\lambda(T)$ 是温度 T 时的普朗克光谱辐射函数；T_s 是表面温度；$\tau_\lambda(\tau'_\lambda)$是大气的上行光谱透射率(下行光谱透射率)；$\rho_{b\lambda}$ 是表面的二向光谱反射率；p 是气压；E_λ^s 是外大气层的光谱辐射。

(2) 从表面反射并透射到大气顶部的太阳光称为反射贡献成分：

$$R_i^r(\theta_s,\theta_v,\varphi_s,\varphi_v)=\frac{\tau_i'(\theta_s)\rho_i(\theta_s,\theta_v,\varphi_s,\varphi_v)\tau_i(\theta_v)E_i^s\cos\theta_s}{\pi}$$

而热红外部分则称为发射贡献成分：

$$\begin{aligned}R_3^e(\theta_v,\varphi_v)=&\varepsilon_3(\theta_v,\varphi_v)B_3(T_s)\tau_3(\theta_v)+\\&\int B_3(T_p)\frac{\delta\tau_3(\theta_v,p)}{\delta p}\mathrm{d}p+\\&\iint KB_3(T)\frac{\delta\tau_3'(\theta',p)}{\delta p}\mathrm{d}p\tau_3(\theta_v,\varphi_v)\sin\theta'\cos\theta'\mathrm{d}\theta'\end{aligned}$$

$$K=\rho_3(\theta_v,\varphi_v,\theta',\varphi')$$

因此，简化可得：

$$R_i^m=R_i^e+R_i^r$$

(3) 波段 3 的反射贡献成分可写为：

$$R_3^r(\theta_s,\theta_v,\varphi_s,\varphi_v)=B_3(T_3^m(\theta_s,\theta_v,\varphi_s,\varphi_v)-B_3(T_3^e(\theta_v,\varphi_v))$$

水蒸气吸收的影响模型

Price J C：一个反射光谱分析方法　Remote Sensing of Environment，1998，64

$$R=T(a)r+\sigma(a)$$

式中，R 是反射系数的遥感值；r 是地表测量到的反射系数；$T(a)$ 是大气透射率；$\sigma(a)$ 是散射系数，变量 a 表示大气状态。

地表温度和发射率的热红外多波段数据恢复模型

Schmugge T, Hook S J, Coll C：根据热红外多波段数据恢复地表温度和发射率　Remote Sensing of Environment，1998，65

1. TIMS 数据校准

TIMS 数据根据照到传感器的辐射进行校准：

$$LS_j=[\varepsilon_jL_j^{BB}(T)+(1-\varepsilon_j)L_j^{sky}]\tau_j+L_j^{atm}$$

式中，LS_j 是传感器观测到的光谱辐射；ε_j 是波长 j 处的地表发射率；$L_j^{BB}(T)$ 是表面温度为 T 的黑体发射的谱辐射；L_j^{sky} 是从大气入射到地表的谱辐射，可从 MODTRAN 得到；L_j^{atm} 是大气发射的谱辐射，可从 MODTRAN 得到；τ_j 是大气的谱透射率，可从 MODTRAN 得到。

如果地表发射率已知，则可对反射的天空辐射进行校正而得到地表温度：

$$T_i = \frac{C_2}{\lambda_i \ln[\varepsilon_j C_1 / L_j \lambda_j^5 \pi + 1]}$$

式中，C_1 是第一辐射常数；C_2 是第二辐射常数；λ_j 是波段 j 的波长；L_i 是自地面的辐射。

2. 温度-发射率分离(TES)

运动学温度的估计值 T_k 取为从 n 个光谱波段估计的温度中的最大值 T：

$$T_k = \max(T_j)，\ j = 1,\cdots,n$$

相对发射率 β_j 可对得到的辐射数据取比值而得，为了对大气效应进行校正，对所有波段进行平均：

$$\beta_j = \frac{L_j L^{BB}(T)}{\overline{L} L_j^{BB}(T)}$$

式中，$\overline{L} = \frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6} L_i$；$L_j^{BB}(T) = \frac{C_1}{\lambda_j^5 \pi[\exp(C_2/\lambda_j T) - 1]}$；

$$\overline{L^{BB}(T)} = \frac{1}{6}\sum_{j=1}^{6} L_j^{BB}(T)$$

发射率估算公式：

$$\varepsilon_{\min} = 0.994 - 0.687 \cdot \mathrm{MMD}^{0.737}$$

式中，$MMD = \max(\beta_j) - \min(\beta_j)$，这个值可用于根据 β 光谱计算发射率 $\varepsilon_j = \beta_i \frac{\varepsilon_{\min}}{\min(\beta_j)}$。

LIBERTY——叶片生物化学浓度对反射谱的影响模型

Dawson T P, Curran P J, Plummer S E：LIBERTY——叶片生物化学浓度对反射谱的影响模型. Remote Sensing of Environment, 1998, 65

(1) 对叶片表面发射的总辐射有贡献的所有辐射成分的方程为：

$$R = \frac{2xm_e + x(1 - 2xm_e)\tau R/(1 - m_e R)}{(1 - m_e R) - (1 - x)(1 - m_e)\tau R}$$

式中，R 是总反射率；m_e 是外部反射系数的平均值；概率系数 x 定义为从细胞内部发出的辐射所占的总的比例，其向与叶片表面距离一个细胞大小的细胞层散射；τ 是总的透射成分。

(2) 当考虑单层叶片细胞时，总的反射系数 R 等于：

$$R = 2xm_e + x(1 - 2xm_e)\tau$$

土壤表面水分指数衰减函数

Duke C, Guerif M：由于冠层和土壤特性的空间及时间变化导致的 SAIL 模型的作物反射系数的估计误差. Remote Sensing of Environment, 1998, 66

土壤光谱反射系数($\rho_s(\lambda)$)可表示为土壤表面水分的指数衰减函数：

$$\rho_s(\lambda) = \rho_{sn}(\lambda) + [\rho_{sx}(\lambda) - \rho_{sn}(\lambda)]e^{-\alpha H}$$

式中，ρ_{sn} 是当表层土接近饱和时；土壤的最小反射系数；ρ_{sx} 是当表层土完全干燥时；土壤的最大反射系数；H 是土壤表层的水分含量(表示为质量百分比)；α 是控制指数衰减的系数。

AVHRR 波段 3 的反射率计算模型

Nerry F, Petitcolin F, Stoll M P：AVHRR 波段 3 的二向反射系数在北非区域的应用研究. Remote Sensing of Environment, 1998, 66

$$\rho_3 = \frac{L_{G,3}^d - L_{G,3}^n \left(\frac{L_{G,4}^n}{L_{G,4}^d}\right)^{a4} \left(\frac{L_{G,5}^n}{L_{G,5}^d}\right)^{a5} \frac{C^d}{C^n} \frac{M^n}{N^d}}{E_{\text{sun}}}$$

式中，$L_{G,i}$ 是地面处的辐射；上标 d 和 n 分别表示白天和夜晚的测量值；幂指数 a_4 和 a_5，以及因子 M^n/M^d 仅依赖于辐射仪的光谱特性；E_{sun} 是地面处的太阳辐射；C 是系数。

森林地面枯落层的散射模型

Wang Y, Day J L, Davis F W：C 和 L 波段雷达后向散射模型对 Loblolly 松树林的地表参数的灵敏度. Remote Sensing of Environment, 1998, 66

经过双向衰减的枯落层反射为：

$$\Gamma_{slab_{pq}} = e^{-2\alpha d/\cos\theta_i}\Gamma_{12_{pq}}$$

式中，d 是枯落层的厚度；θ_i 是枯落层的入射角；α 是枯落层的指数衰减系数；$\Gamma_{12_{pq}}$ ($p,q = h,v$)是 pq 极化方向上枯落层-土壤界面上的反射成分。

植被指数的计算

Ridao E, Conde J R, Minguez M I：根据从灌溉及未灌溉的 faba 豆与卡无叶的豌豆叶冠得到的 9 个植被指数估计光合作用有效辐射吸收比例. Remote Sensing of Environment，1998，66

(1) 再归一化差植被指数 (RDVI)，这个指数是差数植被指数(DVI=TM4−TM3)和 NDVI 的综合：

$$RDVI=(NDVI \times DVI)^{1/2} = (TM4-TM3)/(TM4+TM3)^{1/2}$$

(2) 包括了中红外波段(TM5)的植被指数：
胁迫相关植被指数(STVI)：

$$STVI=TM5 \times TM3/TM4$$

立方比例植被指数(CRVI)：

$$CRVI=(TM4/ TM5)^3$$

定量遥测污染云团光谱模型

张玻、荀毓龙：复杂背景下被动 FTISD 定量遥感污染云团光谱. 遥感学报，1998，2(2)

$$\Delta L^s(v) = \frac{(1-\tau_t)\cdot[B(T_t,v)\cdot\tau_{atm} + B(T_{atm},v)\cdot(1-\tau_{atm})]}{1+(1-\tau_t)\cdot\left[\dfrac{\Delta L^m(v)}{L_o^m(v)}\right]^{-1}}$$

式中，$\Delta L^s(v)$ 为污染云团光谱的计算值；$B(T_{atm},v)$ 为仪器到云团间大气温度为 T_{atm} 的黑体辐射贡献；$B(T_t,v)$ 为云团温度为 T_t 时的黑体辐射；τ_{atm} 为大气透过率；τ_t 为云团的光谱透过率；v 为波数；$\Delta L^m(v)$ 为仪器 FTIS 测量污染云团光谱结果；$L_o^m(v)$ 为无云团的背景辐射亮度。

遥感光谱信号模型

陈晓翔，邓儒瑞，何执兼：基于互补性参数的港湾初级生产力遥感及 GIS 探测模型. 遥感学报，1998，2(4)

$$L(\lambda,Z_0,\mu,\varphi) = L_P(\lambda,Z_0,\mu,\varphi) + L_g(\lambda,Z_0,\mu,\varphi) + L_w(\lambda,Z_0,\mu,\varphi) + L_b(\lambda,Z_0,\mu,\varphi)$$

式中，L 为高度为 Z_0 的传感器接收到的遥感光谱信号；λ，Z_0，μ 和 φ 分别为波长、传感器高度、太阳方位角和太阳高度角；L_P 为与大气散射辐射有关函数；L_g 为与水面反射辐射有关函数；L_w 为与水体散射辐射有关函数；L_b 为与水底反射辐射有关函数。

土地覆盖变化分析公式

布和敖斯尔，刘纪远，关积南：基于季相及纹度特征的中国土地覆盖变化遥感研究. 地理学报，1998，53(增刊)

(1) 归一化植被指数 I_{ndv} (normalized difference vegetation index)：

$$I_{ndv} = (R_{nir} - R_{red})/(R_{nir} + R_{red})$$

$$或 I_{ndv} = (CH_2 - CH_1)/(CH_2 + CH_1)$$

式中，R_{nir} 为 AVHRR1 波段(可见光)反射率；R_{red} 为 AVHRR2 波段(近红外)反射率。

(2) 垂直植被指数 I_{pv} (perpendicular vegetation index)：

$$I_{pv} = (R_{nir} - aR_{red} - b)/(a^2+1)^{1/2}$$

式中，a 和 b 为计算参数。

(3) 比值植被指数 I_{rv} (ration vegetation index)：

$$I_{rv} = R_{nir}/R_{red}$$

(4) 消除土壤影响的植被指数 I_{sav} (soil adapted vegetation index)：

$$I_{sav} = \frac{(1+L)(R_{nir} - R_{red})}{R_{nir} + R_{red} + L}$$

式中，L 为消除土壤影响的参数(在湿度适中的土壤中 L 取 0.5 左右)。

(5) 全球植被指数 I_{gv} (global vegetation index)：

$$I_{gv} = K(\int I_{ndv} + \theta)\cdot 350$$

式中，K 和 θ 分别为计算参数(k 一般取 240，θ 取 0.05)。

(6) 土地覆盖变化敏感区域的空间检索：

$$IA = P\sum_i\sum_j b_{ij}X_{ij}$$

式中，IA 为搜索到的土地覆盖变化危险区域的面积；X_{ij} 为 j 区域(其为土地覆盖类型区域)中第 i 个栅格上属性变量 M_{ij} 的确认值；b_{ij} 为预先知道的相对变量；P 为参数。

地表温度的精确性评估模型

Prata A J, Cechet R P：对根据 GMS-5 VISSR 确定地表温度的精确性的评估. Remote Sensing of Environment 1999, 67

(1) 地表温度的回归方程有两类：
一类是非约束型回归：

$$\hat{T}_s = b_0T_i + c_0T_j + d_0$$

式中，$\hat{T}_s$ 是地表温度的回归估计值；T_i 和 T_j 分别是 AVHRR-2/VISSR 的波段 4 和 5 的卫星亮度温度。

约束型回归模型为：

$$\hat{T}_s = p + q[T_i + k(T_i - T_j)]$$

式中，新的线性回归系数是 p, q 和 k，这个回归的目的是将一个物理约束条件加在回归系数上，即 $b_0 + c_0 = q$。如果已知这个约束条件适合于海面温度，则可预料对地表也成立。

(2) 地表温度(LST)的算法已有较多成果发表：

Price(1984) 算法：

$$T_{PRI} = [T_4 + 3.33(T_4 - T_5)]\frac{5.5 - \varepsilon_4}{4.5} - 0.75T_4\Delta\varepsilon$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_4 - \varepsilon_5$$

Prata (1993)算法：

$$T_{PRA} = \frac{3.42}{\delta}T_4 - \frac{2.42}{\delta}T_5 + d$$

$$\delta = \varepsilon_4 + 2.42\tau_5\Delta\varepsilon$$

$$d = \frac{1-\delta}{\delta}\left[(B_4 - 6)\left(\frac{\partial B_4}{\partial T}\right)_{T_4}^{-1} - T_4\right]$$

Becker 和 Li(1995)算法：

$$T_{B\&L} = A_0 + PT^+ + MT^-$$

$$T^+ = \frac{T_4 + T_5}{2}$$

$$T^- = \frac{T_4 - T_5}{2}$$

$$A_0 = -7.491 - 0.407w$$

$$P = 1.0290 + (0.2106 - 0.0307w\cos\theta)(1 - \varepsilon_4) - (0.3696 - 0.0737w)\Delta\varepsilon$$

$$M = 4.25 + 0.56w + (3.41 + 1.59w)(1 - \varepsilon_4) - (23.85 - 3.89w)\Delta\varepsilon$$

Coll 和 Caselles (1997)算法，

$$T_{C\&C} = T_4 + [1.34 + 0.39(T_4 - T_5)](T_4 - T_5) + 0.56 + \alpha(1 - \varepsilon) - \beta\Delta\varepsilon$$

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_4 + \varepsilon_5}{2}$$

$$\alpha = (b_4 - b_5)r\tau_5 + b_4$$

$$\beta = \gamma\tau_5 b_5 + \frac{\alpha}{2}$$

$$\gamma = \frac{1 - \tau_4}{\tau_4 - \tau_5}$$

$$b_4 = (0.198 + 0.167w)T_4 - (62.3w - 10)$$

$$b_5 = (0.234 + 0.206w)T_5 - (78.9w - 5)$$

式中，w 是可降水量；B 是普朗克常数；τ_i 是在波段 i 的透射率；而 ε_i 是波段 i 的波段平均发射率(假定独立于角度)。

(3) 利用 GMS-5 的 VISSR 数据的 LST 算法：

GMS5a (无水蒸气资料)：

$$T_{gms5a} = \frac{1}{\delta}T_4 + \frac{3.146}{\delta}(T_4 - T_5) + \kappa\frac{1-\delta}{\delta}$$

$$\delta = \varepsilon_4 + 2.36\Delta\varepsilon$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_4 - \varepsilon_5$$

$$\kappa = -253.16$$

GMS5b (有可降水量资料)：

$$T_{gms5b} = T_4 + [1.34 + 0.507(T_4 - T_5)](T_4 - T_5) + 0.56 + \alpha(1 - \varepsilon) - \beta\Delta\varepsilon$$

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_4 + \varepsilon_5}{2}$$

$$\alpha = 2.517(b_4 - b_5) + b_4$$

$$\beta = 2.517b_5 + \frac{\alpha}{2}$$

$$b_4 = (0.198 + 0.167w)T_4 - (62.3w - 10)$$

$$b_5 = (0.234 + 0.206w)T_5 - (78.9w - 5)$$

森林覆盖变化探测的相对校准模型

Tokola T, Löfman S, Erkkilä A: 森林覆盖变化探测的多时 Landsat 数据的相对校准。Remote Sensing of Environment, 1999, 68

(1) 用于校准的波段—波段回归模型：

$$\hat{y}_i = \beta_0 + \beta_1 x_i$$

式中，$\hat{y}_i$ 表示像元 i 后期图像上某个波段的值；x_i 表示其前期图像在这个波段的值。

(2) 用于校准的两图像多波段回归模型：

$$\hat{y}_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \beta_3 x_{i3} + \beta_4 x_{i4}$$

式中，$\hat{y}_i$表示像元i后期图像上某个波段的值；x_{ij}表示像元i前期图像在波段j的值。

(3) 用于校准的多图像单波段回归模型：

$$\hat{y}_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \beta_3 x_{i3}$$

式中，$\hat{y}_i$表示像元i在1992年的图像上某个波段的值；x_{ij}表示像元i在图像j上的值；β_i是回归参数。

冠层叶绿素浓度的机载波谱信号估计模型

Jago R A, Cutler M E J, Curran P J: 从野外及机载波谱信号估计冠层叶绿素浓度. Remote Sensing of Environment, 1999, 68

(1) 草地区域上的红边位置(REP, nm)与叶绿素浓度的关系为：

$$\text{Chl} = -32.13 + 0.05\text{REP} \quad (r = 0.84)$$

式中，Chl是叶绿素浓度。

(2) Broadbalk, Rothamsted地区冬小麦区域上REP与叶绿素浓度的关系为：

$$\text{Chl} = 0.08\text{REP} - 53.26 \quad (r = 0.81)$$

(3) 对Isle, Grain地区的牧草地区域，从1996年的CASI数据生成的REP与叶绿素浓度的关系为：

$$\text{Chl} = -389.89 + 0.55\text{REP} \quad (r = 0.71)$$

(4) 对Broadbalk, Rothamsted地区冬小麦区域，叶绿素指数([Cl])与浓度的关系为：

$$[\text{Cl}] = 4.20 + 0.02\text{Chl} \quad (r = 0.82)$$

(5) 对Broadbalk, Rothamsted地区冬小麦区域，[Cl]和从CASI获取的REP之间的关系为：

$$[\text{Cl}] = 3.11\text{REP}^{39.39} \quad (r = 0.86)$$

线性谱混合模型(LSMM)

Haro F J G, Gilabert M A, Meliá J: 从混合谱中提取端元. Remote Sensing of Environment, 1999, 68

令n为谱观测的维数，假设有c个组成端元，观测样本数为s，则LSMM表示为：

$$d_{ik} = \sum_{j=1}^{c} r_{ij} f_{jk}$$

或表示为矩阵形式：

$$D = R \cdot F$$

式中，D是混合谱矩阵($n \times s$)；R是端元矩阵($n \times c$)；F是比例矩阵($c \times s$)。研究的目标是从混合谱矩阵D中估计矩阵R(比例矩阵F未知)。

方法1：因子谱旋转法：
目标函数表示为：

$$P_1(t_{uv}) = \sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{s}\left[\frac{f_{ik}(t_{uv})}{\langle f\rangle}\right]^2 \delta(f_{ik}) + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{c}\left[\frac{r_{ij}(t_{uv})}{\langle r\rangle}\right]^2 \delta(r_{ij}) + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{s}\left[\frac{\varepsilon_{ij}(t_{uv})}{\sigma_{\varepsilon ij}}\right]^2$$

式中，t_{uv}是线性转换矩阵T的系数；$\varepsilon = D - R \cdot F$，$\varepsilon$是残差矩阵；$\delta(x) = \begin{cases} 0 & (x > 0) \\ 1 & (x < 0) \end{cases}$，$\sigma_{\varepsilon ij}$表示元素$\varepsilon_{ij}$的不确定性；$\langle f\rangle$和$\langle r\rangle$分别是矩阵$F$和$R$的平均值。

方法2：目标在因子空间中的位置探索：
目标函数表示为：

$$P_2 = \sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{s}\left(\frac{\bar{f}_{pik}}{\langle \bar{f}_p\rangle}\right)^2 \delta(\bar{f}_{pik}) + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{s}\frac{\varepsilon_{ij}}{\sigma_{\varepsilon ij}} + \alpha \cdot \text{DIS}$$

式中，E是一个$c \times c$未知参数矩阵；$\overline{F_P}$是一个$c \times s$矩阵，通过基于平方最小限制的极小化过程由矩阵E和$\bar{F}$计算而得，即$\bar{F} = \overline{F_P} \cdot E$；$\sigma_{\varepsilon ij}$表示单元$\varepsilon_{ij}$的不确定性；$\langle f_p\rangle$表示矩阵$\overline{F_P}$的平均值；函数DIS可表达为：$\text{DIS} = \sum_{i=1}^{c}\sum_{j=1}^{s}\sum_{k=1}^{c}\left|\bar{f}_{ij} - e_{ik}\right|^{\beta}$，它表示计算的端元$E$的位置和数据云$\bar{F}$的接近度，$\alpha$和$\beta$是常数。

叶片光学特性随机性模型的修订模式

Maier S W, Lüdeker W, Günther K P: ASLOP——一种叶片光学特性随机性模型的修订模式. Remote Sensing of Environment, 1999, 68

SLOP(叶片光学特性随机模型)利用一个统计过程来描述叶片中光的辐射传输。

(1) 参照Morel和Bricaud(1981)的吸收系数：

$$a(\lambda) = \frac{\pi}{4} \cdot \left\{1 + \frac{2e^{-\rho(\lambda)}}{\rho(\lambda)} + \frac{2[e^{-\rho(\lambda)} - 1]}{\rho^2(\lambda)}\right\} \times d^2_{\text{chloroplast}} \cdot c_{\text{chloroplast}} + a_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) \cdot w_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$$

$$\rho(\lambda) = \frac{6}{\pi} \cdot \frac{1}{d^2_{\text{chloroplast}} \cdot c_{\text{chloroplast}}} \cdot \sum_{\text{pigments}} a_i^*(\lambda) \cdot c_i$$

式中，$a(\lambda)$ 是吸收系数；$a_i^*(\lambda)$ 是某种色素的特定的吸收系数；c_i 是这种色素的浓度；$a_{H_2O}(\lambda)$ 是液态水的吸收系数；$w_{H_2O}(\lambda)$ 是水的体积浓度；$d_{chloroplast}$ 和 $c_{chloroplast}$ 分别是叶绿体的直径和浓度。

(2) 根据吸收系数，吸收概率 $P_{absorption}(\lambda)$ 和散射概率 $P_{scattering}(\lambda)$ 可表示为：

$$P_{absorption}(\lambda)=\frac{a(\lambda)}{a(\lambda)+s}\cdot[1-e^{-(a(\lambda)+s)\cdot L}]$$

$$P_{scattering}(\lambda)=\frac{s}{a(\lambda)+s}\cdot[1-e^{-(a(\lambda)+s)\cdot L}]$$

式中，L 是光的路径长度；s 是散射系数。

FLIM 模型

Gemmell F, Varjo J：利用作为两个光谱指数的函数的反射反演模型对北方森林某个试验站点的生物物理特性进行估计。Remote Sensing of Environment，1999，68

$$\rho=R_cC+R_gG$$

式中，ρ 是在给定光谱波段群丛的反射系数；R_c 是无限厚冠层的反射系数(即零透射率)；R_g 是背景反射系数；$C=(1-T_iT_v)c_ic_v$ 是树冠因子，c_i 是太阳照射方向上的阴影覆盖率，c_v 是视方向上的观察到的覆盖率；G 是地面因子，其计算公式可表达为 $G=a\cdot T_i\cdot T_v+b\cdot T_v+d\cdot T_i+g$，$T_v=\exp(-\alpha\cdot I_{la}\cdot\sec\theta_v)$ 是视方向上的平均树冠透射率，$T_i=\exp(-\alpha\cdot I_{la}\cdot\sec\theta_i)$ 是在太阳照射方向上的平均树冠透射率，α 是消光系数，I_{la} 是树冠的叶面积指数，a 是具有一个荫蔽背景的树冠表面的像元比例，b 是具有一个被阳光照射的背景的树冠表面的像元的比例，g 是被太阳照射且能观察到的背景的像元的比例，d 是荫蔽且能观察到的背景的像元的比例，θ_i 是太阳天顶角，θ_v 是观察天顶角。

温度无关的谱指数

Li Z L, Becker F, Stoll M P et al：对从模拟的热红外多波段扫描仪数据提取相对谱发射率信息的不同方法的评估。Remote Sensing of Environment，1999，69

Becker 和 Li (1990, 1995)定义波段 i 和 r 温度无关的谱指数 I_{ir} 为：

$$I_{ir}=\frac{C_r^{n_{ir}}}{C_i}\frac{a_r^{n_{ir}}}{a_i}\frac{R_i}{R_r^{n_{ir}}}$$

式中，$n_{ir}=\frac{n_i}{n_r}$，n 是温度在合理范围内变化时的特定波段的常数；$C_k=\frac{1-\beta_k}{1-R_{atk\downarrow}/B_k(T_{gk})}$，$T_{gk}$ 是波段 k 的亮度温度；$\beta_k=\frac{R_{atk\downarrow}}{B_k(T_s)}\cong\frac{R_{atk\downarrow}}{B_k(T_g^{\max})}$，$(k=i,r)$，$T_g^{\max}$ 是对给定像元在 N 个波段中的最高表面亮度温度，$R_{atk\downarrow}$ 是在波段 k 的下行半球面大气辐射，而 $B_k(T_s)$ 是当表面为温度 T_s 的黑体时测量到的波段辐射；R_i 是在地面水平观测到的波段 i 的辐射；I_{ir} 基本独立于表面温度，可近似为 $I_{ir}\cong\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_r^{n_{ir}}}$，$\varepsilon_i$ 是波段 i 的发射率。

利用 C 波段雷达数据监视农作物生物量的方法

Wigneron J P, Ferrazzoli P, Olioso A et al：利用 C 波段雷达数据监视农作物生物量的简单方法。Remote Sensing of Environment，1999，69

(1) 辐射传输方程的一阶解为：

$$\sigma_{can}^{\circ}=\sigma_v^{\circ}+\sigma_s^{\circ}/L^2$$

式中，σ_{can}° 是大豆的后向散射系数；σ_v° 是作物冠层的直向的后向散射成分；σ_s° 是裸地的后向散射系数；L 是单向衰减因子，可表达为 $L=\exp(\tau/\cos\theta)$，τ 是植被层的光学厚度，θ 是入射角。

(2) 散射元倾角分布[$p(\beta)$]为：

$$p(\theta)=\begin{cases}A\cdot\cos^n[\pi/2(\beta-\beta_m)] & (\beta_1<\beta<\beta_2)\\ 0 & (其他)\end{cases}$$

式中，A 是归一化因子；n 是形状因子；概率密度在 β_m 处取得最大值，而在 χ_0 处为 0；β_1 和 β_2 是积分的上下限。

(3) 两个基本的关系：

$$\tau=\tau(\theta,W_C)$$

$$\sigma_v^{\circ}=\sigma_v^{\circ}(\theta,\tau)$$

式中，W_C 是植物中水分的总量，在作物生长期对 HH 极化方向进行了校准的关系方程为：当 $W_C<1.85\ kg\cdot m^{-2}$，则 $\tau(\theta)=b(\theta)W_C$，当 $W_C>1.85\ kg\cdot m^{-2}$，则 $\tau(\theta)=1.55$，$\sigma_v^{\circ}=C\cdot[1-\exp(-2D\cdot\tau/\cos\theta)]$，$b(\theta)$、$C$ 和 D 是回归参数，$C=0.0631$，$D=1.1831$。

增强植被指数(I_{ev})复合方法

Leeuwen W J D V, Huete A R, Laing T W：MODIS 植被指数复合方法——利用 AVHRR 数据的原型模型。Remote Sensing of Environment，1999，69

$$I_{ev}=2.5(\rho_{NIR}-\rho_{red})/(L+\rho_{NIR}-C_1\rho_{red}-C_2\rho_{blue})$$

式中，ρ_λ 是相应的波长的表面反射因子(λ=红光，近红外，蓝光)；L 是冠层背景校正因子；C_1 和 C_2 是权重因子，其对大气中的气溶胶影响进行校正。增强的植被指数由 Huete 等 (1997)提出，其目的是提高 I_{ev} 对更宽的、全球范围的植被状况的灵敏性。

机载 ASAS 高光谱 BRDF 数据的各向异性因子的分类模型

Sandmeier S, Deering D W：利用机载 ASAS 高光谱 BRDF 数据对北方森林的结构分析和分类，Remote Sensing of Environment，1999，69

两个量被用于从高光谱 BRDF 数据中提取结构信息：第一个是各向异性因子(f_{ani})：

$$f_{ani}(\lambda,\theta_i,\varphi_i,\theta_r,\varphi_r)=\frac{R(\lambda,\theta_i,\varphi_i,\theta_r,\varphi_r)}{R_0(\lambda,\theta_i,\varphi_i)}$$

式中，R 是二向反射因子；R_0 是天底角反射因子；λ 是波长；θ 是天顶角；φ 是方位角；下标 i 表示照射方向；下标 r 表示观察方向。

第二个量是各向异性指数(I_{anx})，定义为每个光谱波段中最大反射值与最小反射值的比值：

$$I_{anx}(\lambda,\theta_i)=\frac{R_{max}(\lambda)}{R_{min}(\lambda)}$$

式中，R_{max} 是最大二向反射因子；R_{min} 是最小二向反射因子。

协方差-方差比模型

Barton I J，Prata A J：应用协方差-方差法从卫星图像恢复大气水蒸气的难点，Remote Sensing of Environment，1999，69

Ottle (1997)提出协方差-方差比：

$$R_{12,11}=\frac{\sum_n(T_{11}(n)-\overline{T_{11}})(T_{12}(n)-\overline{T_{12}})}{\sum_n(T_{11}(n)-\overline{T_{11}})^2}$$

式中，T_{11} 和 T_{12} 相应于 11 μm 和 12 μm 波段的分离窗亮度温度，而上横杠表示在选择的小区域上取平均值。

总的大气水蒸气也可从两个被动式微波波段的亮度温度计算：

$$WV=24.6795-10.2242\ln(280-B24)+5.4746\ln(280-B36)-0.0150(U-7)$$

式中，WV 是微波水蒸气总量(g·cm^{-2})；$B24$ 和 $B36$ 分别相应于 24 GHz 和 36 GHz 波段的微波亮度温度；而 U 是从高度计得到的表面风速。

露水形成的最大速率及其形成总量的计算公式

Jackson T J，Moy L：露水对被动式地表微波观测的影响，Remote Sensing of Environment，1999，70

(1) 露水形成的最大速率(E_p)：

$$E_p=(sR_n)/[\lambda(s+\gamma)]$$

式中，s 是饱和水蒸气压曲线在气温和露点之间区域的斜率的平均值；γ 是湿度计常数；R_n 是净辐射；λ 是水分汽化/凝结的潜热。

(2) 露水形成的总量计算公式为：

$$Y=9.3304A+0.23588B-0.1348C+0.4167D-20.3038$$

式中，Y 是日露水总量；A 是气温的夜晚冷却率；B 是相对湿度；C 是 1.5 m 处风速；D 是总的净辐射。

岩石试验室反射光谱的相似系数聚类分析模型

王志刚，朱振海，王红梅等：光谱角度填图方法及其在岩性识别中的应用，遥感学报，1999，3(1)

相似系数 $\cos\theta_{ij}$ 模型：

$$\cos\theta_{ij}=\frac{\sum_{k=1}^{n}X_{ik}X_{jk}}{\sum_{k=1}^{n}X_{ik}^2\cdot\sum_{k=1}^{n}X_{jk}^2}$$

式中，k 为变量$(1,2,\cdots,n)$；i、j 为样品数$(1,2,\cdots,N)$；X 为样品的值。

X 波段散射计辐射计组合系统理论分析模型

金亚秋，姚寿亮，张南雄等：X 波段散射计辐射计组合系统对树木背景中目标的观测研究，遥感学报，1999，3(2)

(1) 同极化后向散射系数模型：

$$\sigma_{HH}^{0(I)}(\theta)=2\pi^2\left|\frac{X_{01i}}{D_{2i}}\right|^2\left[\frac{1}{4k_{1zi}''}\Phi(2\bar{k}_{\rho i},2k_{1zi})\times\left(1-e^{-4k_{1zi}''d}\right)\times\left(1+|R_{12i}|^4e^{-4k_{1zi}''d}\right)+4d\Phi(2\bar{k}_{\rho i},0)|R_{12i}|^2e^{-4k_{1zi}''d}\right]$$

$$\sigma_{VV}^{0(I)}(\theta)=2\pi^2\left|\frac{k_{0zi}Y_{01i}}{k_{1zi}F_{2i}}\right|^4\left[\frac{1}{4k_{1zi}''}\Phi(2\bar{k}_{\rho i},2k_{1zi})\times\left(1-e^{-4k_{1zi}''d}\right)\times\left(1+|S_{12i}|^4e^{-4k_{1zi}''d}\right)+4d\Phi(2\bar{k}_{\rho i},0)|S_{12i}|^2\times e^{-4k_{1zi}''d}\left(\cos^2\theta_t-\sin^2\theta_t\right)^2\right]$$

式中，Φ 为随机介质介电起伏相关函数的 Fourier 变

换；R_{12} 为(树木)散射层与地面之间的反射系数；上标 $''$ 表示虚部；下标 i 表示入射角方向。

(2) 一层随机介质辐射亮度温度模型：

$$T_{BH}(\theta)=A_1\left|\frac{X_{01}}{D_2}\right|^2\left(1-e^{-2k_{iz}'' d}\right)\left(1+|R_{12}|^2 e^{-2k_{iz}'' d}\right)+A_2\left|\frac{X_{01}X_{12}}{D_2}\right|^2 e^{-2k_{iz}'' d}$$

$$T_{BV}(\theta)=A_1\left|\frac{k_0 Y_{01}}{k_1 F_2}\right|^2\left(1-e^{-2k_{iz}'' d}\right)\left(1+|S_{12}|^2 e^{-2k_{iz}'' d}\right)+A_2\left|\frac{k_0 Y_{01} Y_{12}}{k_2 F_1}\right|^2 e^{-2k_{iz}'' d}$$

式中，$A_1=\frac{k_0}{\cos\theta}\frac{\varepsilon_1''}{\varepsilon_0}T_1\frac{1}{2k_{1z}''}$；$A_2=\frac{k_0}{\cos\theta}\frac{\varepsilon_2''}{\varepsilon_0}T_2\frac{1}{2k_{2z}''}$。

LAI 获取的短波红外修正模型

Brown L, Chen J M, Leblanc S G et al：北方森林的 LAI 获取的简单比值法的短波红外修正。Remote Sensing of Environment, 2000, 71

经过短波红外修正的简单比值(R_s)定义为约化简单比值(R_{rs})：

$$R_{rs}=R_s\cdot\left(1-\frac{R_{swi}-R_{swi\min}}{R_{swi\max}-R_{swi\min}}\right)$$

式中，R_{swi} 是短波红外反射系数；$R_{swi_{min}}$ 是从一个完全郁闭的冠层测到的短波红外反射系数；$R_{swi_{max}}$ 是从一个开放的冠层测到的短波红外反射系数。

小波分析函数

Li Z T, Kafatos M：美国植被的年季变化及其与厄尔尼诺南方涛动的关系。Remote Sensing of Environment, 2000, 71

一个连续时间序列信号的正交小波序列近似 $f(t)$ 表示为：

$$f(t)\approx S_J(t)+D_J(t)+\cdots+D_1(t)$$

式中，J 是对不同时间尺度的多分辨率成分的数目；$S_J(t)=\sum_k s_{J,k}\varphi_{J,k}(t)$，称为光滑信号(低频)，系数 $s_{J,k}$ 是小波变换系数，函数 $\varphi_{J,k}(t)$ 是近似小波函数；$D_J(t)=\sum_k d_{J,k}\psi_{J,k}(t)$，$D_J(t)$ 称为细节信号(高频)，系数 $d_{J,k}$ 同样是小波变换系数，函数 $\psi_{J,k}(t)$ 同样为近似小波函数。

森林的直向多谱段反射模型

Kuusk A, Nilson T：森林的直向多谱段反射模型。Remote Sensing of Environment, 2000, 72

(1) 天空辐射：

森林对天空辐射的半球面-直向反射系数 ρ_D 简化为：

$$\rho_D(r_2)\approx\frac{\int d(\theta_1,\varphi=\pi/2)\rho_I(\theta_1,\theta_2,\varphi=\pi/2)\mu_1\mathrm{d}\theta_1}{D}$$

式中，d 是方向 $r_1(\theta_1,\varphi_1)$ 上的天空辐射；$\mu_1=\cos\theta_1$；而 D 是从天空向下的漫射通量；ρ_I 是二向反射系数。

(2) 辐射的多重散射：

在计算多重散射强度时用到了有效叶面积指数值 $I_{\mathrm{laeff}}^{(multi)}$：

$$I_{\mathrm{laeff}}^{(multi)}=\frac{\sum_j(k_{\mathrm{clump},j}I_{\mathrm{la}\,j}+I_{\mathrm{ba}\,j})}{\Omega_E}$$

式中，$\Omega_E=\frac{0.5\sum_j(k_{\mathrm{clump},j}I_{\mathrm{la}\,j}+I_{\mathrm{ba}\,j})}{\cos\theta_s\sum_j\lambda_j S_{\mathrm{crown},j}(\theta_s)c_j(\theta_s)}$；$c_j(\theta_s)=\frac{\ln\{1-[1-a_{1j}(\theta_s)](1-GI_j)\}}{1-GI_j}$，$a_{aj}(\theta_s)$ 是第 j 类树的树冠中在太阳照射方向上的间隙概率，GI_j 是第 j 类树的数目的相对方差；$k_{\mathrm{clump},j}$ 是第 j 类树种叶片的丛生系数；$I_{\mathrm{ba}\,j}$ 是分枝面积指数；θ_s 是太阳顶角。

陆地表面发射率的计算模型

Morland J C, Grimes D I F, Dugdale G et al：利用航空遥感数据估计 24~157 GHz 波段陆地表面发射率。Remote Sensing of Environment, 2000, 73

(1) 发射率表示为：

$$e=\frac{T_0-T_a}{T_p-T_a}$$

式中，e 是地表发射率；T_0 是上行辐射的亮度温度的观测值；T_p 是表面物理温度；T_a 是下行辐射的亮度温度。

(2) 表面物理温度 T_p：

$$T_p=[T_0^{IR}-(1-e^{IR})T_a^{IR}+i_{\mathrm{rcorr}}]/e^{IR}$$

式中，上标 IR 表示与 8μm 到 14μm 波段相联系的量；i_{rcorr} 是对飞机与地表之间的大气效应的修正项；$e^{IR}=C_{\mathrm{veg}}e_{\mathrm{veg}}^{IR}+(1-C_{\mathrm{veg}})[(1-C_{\mathrm{rock}})e_{\mathrm{soil}}^{IR}+C_{\mathrm{rock}}e_{\mathrm{rock}}^{IR}$，$e_{\mathrm{veg}}^{IR}$，$e_{\mathrm{soil}}^{IR}$ 和 e_{rock}^{IR} 分别是植被、土壤和岩石的发射率，C_{veg} 是植

被覆盖比例的估计值，C_{rock}是非植被区域中岩石的覆盖比例的估计值。

热发射率对比方法

French A N, Schmugge T J, Kustas W P: 利用热发射率对比判别衰老植被. Remote Sensing of Environment, 2000, 74

(1) 发射率 ε 表示某种物质在给定温度下的谱辐射 L 与理想黑体谱辐射 L_{BB} 的比值：

$$\varepsilon = \frac{L}{L_{BB}}$$

式中，在温度发射率分离算法中，相对发射率 β_i 可表达为 $\beta_i \equiv \frac{\varepsilon_i}{\bar{\varepsilon}}$；$\varepsilon_i$ 表示波段发射率；$\bar{\varepsilon}$ 表示在所有波段上的平均发射率。

(2) 取值的最大区间宽度记为 MMD (表观发射率的最大值与最小值的差)，则可用来计算最小发射率 $\varepsilon_{\min}$：

$$\varepsilon_{\min} = a - b \cdot \mathrm{MMD}^c$$

式中，a，b 和 c 是根据实验数据确定的常数，余下波段的发射率的求解则可表达为 $\varepsilon_i = \beta_i \frac{\varepsilon_{\min}}{\min(\beta_i)}$。

雪水当量的计算模型

Singh P R, Gan T Y: 利用被动微波亮度温度数据获取雪水当量。Remote Sensing of Environment, 2000, 74

(1) 下面的方程为过去提出的利用被动微波数据计算雪水当量(SWE)的基本形式：

$$SWE = K_1 + K_2(V_{19} - V_{37})$$

$$SWE = K_3 + K_4(H_{19} - H_{37})(1 - A_F)$$

$$SWE = K_5 + K_6[(V_{18SWE} - V_{37SWE}) - (V_{18SWE=0} - V_{37SWE=0})]$$

$$SWE = K_7 A_{TUNDRA}(H_{19} - H_{37}) + K_8(A_W)T_a + K_9$$

$$SWE = K_{10}(H_{18} - H_{37})/(1 - A_F)$$

式中，K_1 到 K_{10} 是参数；V_{18SWE} 和 $V_{18SWE=0}$ 分别是雪覆盖处和无雪处在 18GHz 处的垂直极化亮度温度(TB)；A_F 是森林覆盖比例；T_a 是气温；A_{TUNDRA} 和 A_W 分别是在每个 SSM/I 覆盖区中冻土区和水体面积。

(2) 针对 SSM/I 数据的新算法：

$$SWE = K_{11}(V_{19} - H_{37}) + K_{12}A_{MSL} + K_{13}(1 - A_F) + K_{14}(1 - A_W)T_a + K_{15}T_{PW}$$

$$SWE = K_{21}(\text{TB-}V_{19} - \text{TB-}V_{37}) + K_{22}(\text{TB-}H_{19}) + K_{23}A_{MSL} + K_{24}A_F$$

式中，前缀 TB-表示表面亮度温度；A_{MSL} 表示在平均海平面上的平均海拔高度；TPW 是总的可能降水量；K_i 是参数。

红光-近红外反射系数空间中的植被等值线分析模型

Yoshioka H, Miura T, Huete A R et al: 红光-近红外反射系数空间中的植被等值线分析。Remote Sensing of Environment, 2000, 74

(1) 植被等值线方程的一个新定义：

$$\rho_N = a\gamma\rho_R + D + O^2$$

式中，$\gamma = \frac{\beta T_{vN}^2 + (1-\beta)^{*}}{\beta T_{vR}^2 + (1-\beta)}$；$D = D_N - a\gamma D_R$；$D_N = \beta\rho_{vN} + b[\beta T_{vN}^2 + (1-\beta)]$；$D_R = \beta\rho_{vR}$；$O^2 = O_N^2 - a\gamma O_R^2$；$O_N^2 = \frac{\beta T_{vN}^2 R_{vN} R_{sN}^2}{1 - R_{vN}R_{sN}}$；$O_R^2 = \frac{\beta T_{vR}^2 R_{vR} R_{sR}^2}{1 - R_{vR}R_{sR}}$；$R$ 和 N 分别表示红光和近红外波段；ρ 是冠层半球面-直向反射系数因子；R_s 是背景土壤表面的双半球面反射系数；R_v 是对从植被冠层底部进入；然后从表面向下散射的光子的双半球面反射系数；β 是绿色覆盖比例；T_v 是冠层的下行和上行半球面透射系数的对数平均；a 是表示纯粹土壤的光学性质的变量。

(2) 等值线间的相互作用表示为：

$$(\rho_R, \rho_N) = \left(\frac{b-D}{a(\gamma-1)}, \frac{\gamma b - D}{\gamma - 1}\right) = \frac{\sqrt{1+a^2}(b-D)}{a(\gamma-1)} \frac{1}{\sqrt{1+a^2}}(1,a) + (0,b)$$

植被-温度指数模型

Kogan F N: 卫星观测到的世界陆地生态系统对厄尔尼诺/南方涛动的敏感性。Remote Sensing of Environment, 2000, 74

(1) 植被状态指数(I_{vc})：

$$I_{vc} = \frac{I_{ndv} - I_{ndv\min}}{I_{ndv\max} - I_{ndv\min}} \times 100$$

(2) 温度状态指数(I_{tc})：

$$I_{tc} = [(T_{b\max} - T_b)/(T_{b\max} - T_{b\min})] \times 100$$

(3) 植被-温度指数(I_{vt})：

$$I_{vt} = aI_{vc} + bI_{tc}$$

式中，I_{ndv}、$I_{ndv_{max}}$ 和 $I_{ndv_{min}}$ 分别是平滑化的周归一化植被指数、多年绝对最大值和最小值；T_b，$I_{b_{max}}$ 和 $I_{b_{min}}$ 分别是平滑化的周亮度温度、多年绝对最大值和最小值；a 和 b 是参数，分别表示 I_{vc} 和 I_{tc} 组合的定量关系。

叶片尺度的测量及模拟模型

Tejada P J Z, Miller J R, Mohammed G H et al：叶绿素荧光对植被表观反射系数的影响：Ⅰ．叶片尺度的测量及模型模拟．Remote Sensing of Environment, 2000, 74

（1）单片叶反射系数和透射率的实验室测量：

$$R_{fl} = \frac{(R_{SS} - R_{SD})R_{fl\,BaSO_4}}{R_{TS} - R_{SD}}$$

$$T_{ns} = \frac{(T_{SP} - T_{DP})R_{fl\,BaSO_4}}{R_{ST} - R_{SD}}$$

式中，R_{fl} 是反射系数；T_{ns} 是透射率；R_{SS} 是反射信号；R_{SD} 是反射信号的暗电流测量值；R_{TS} 是反射的固内部标准；T_{SP} 是透射信号；T_{DP} 是透射信号暗电流测量值；R_{ST} 是反射的外部标准；$R_{fl_{BaSO_4}}$ 是硫酸钡的反射系数。

（2）模型模拟：

在任意波长的特定线性吸收系数(k, mm^{-1})可表示为：

$$k = \gamma(\sum C_j K_j)/N \cdot D_L + k_e / D_L$$

式中，C_j 是单位面积中层要素 j 的含量；K_i 是相应的特定的吸收系数；N 是 PROSPECT 模型的结构参数，k_e 表示白化叶片的剩余吸收项；γ 是代表层中辐射的漫射系数的变化的因子；D_L 是叶层的总厚度。

植被光谱的光学-生物物理关系模型

Gao X, Huete A R, Ni W G, Miur T：没有背景污染的植被光谱的光学-生物物理关系．Remote Sensing of Environment, 2000, 74

（1）Huete (1987)利用一个一阶相互作用模型将在不完全植被冠层测量到的光谱分解为土壤有关成分和与土壤无关的纯粹植被成分．模型可表示为：

$$d_m(\lambda) = E_0(\lambda) r_s(\lambda) t_c^2(\lambda) + E_0(\lambda) r_c(\lambda)$$

式中，d_m 是土壤-冠层混合光谱；$E_0 r_s t_c^2$ 是土壤有关成分，其表达为冠层顶部总的辐射 E_0，土壤反射系数 r_s、及下行与上行总的冠层透射率 t_c^2 的乘积；r_c 是植被反射系数．

（2）有效叶面积指数(L_e)在森林冠层模型中得到应用：

$$L_e = D_{fav} \cdot V_{crown} \cdot \lambda = D_{fav} \cdot 4/3 \cdot \pi r^2 b \cdot \lambda = D_{fav} \cdot 4/3 \cdot b \cdot \ln \frac{1}{1 - y_{crowncover}\%}$$

$$y_{crown\,cover}(\%) = 1 - e^{-\lambda \pi r^2}$$

式中，D_{fav} 是叶片面积的体积密度；V_{crown} 是树冠的体积；r 是水平面上的树冠半径；b 是垂直方向上树冠半径；λ 是树的密度；y 为树冠覆盖比率。

水面反射率 R_W 模型

疏小舟，尹球，匡定波：内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系．遥感学报，2000，4(1)

$$R_W \approx \frac{b_W + b_S + b_P}{a_W + a_S + a_P + a_Y}$$

式中，b_W，b_S 和 b_P 分别为水、无机悬浮物质和藻类物质的后向反射系数，a_W，a_S，a_P 和 a_Y 分别为水、无机悬浮物质和藻类物质和黄色物质的吸收系数．

宽波段热红外方向性辐射建模

阎广建，李小文，王锦地等：宽波段热红外方向性辐射建模．遥感学报，2000，4(3)

（1）不同温表面方向性辐射的概念模型(LSF 概念模型)：

$$L_\lambda(\mu, T_0) = \varepsilon_{BRDF} B_\lambda(T_0) + \sum_i f_i(\mu) \varepsilon_i \Delta T_i K_\lambda(T_0) B_\lambda(T_0)$$

式中，$L_\lambda(\mu, T_0)$ 为 μ 方向的光谱辐射；ε_{BRDF} 基尔霍夫定律的方向"r"发射率；$B_\lambda(T_0)$ 表示温度在 T_0 的黑体的光谱辐射；$f_i(\mu)$ 是像元中第 i 个组分所占的比例；ε_i 为组分发射率；ΔT_i 为对应的组分温度与参考温度 T_0 的差值；$K_\lambda(T_0)$ 为波长 λ 和 T_0 的函数．

（2）宽波段热红外辐射建模：

$$L_{\Delta\lambda}(\mu, T_0) = \varepsilon_{BRDF} B_{\Delta\lambda}(T_0) + \sum_i f_i(\mu) \varepsilon_i \Delta T_i S_{\Delta\lambda}(T_0)$$

植被群体反射光谱及其导数光谱与叶绿素密度的相关分析模型

吴长山，项月琴，郑兰芬等：利用高光谱数据对作物群体叶绿素密度估算的研究．遥感学报，2000，4(3)

导数光谱与叶绿素密度的相关公式：

$$D_{CH} = aR' + b$$

式中，D_{CH} 为农作物的叶绿素密度；$R' = \lim_{\Delta\lambda \to 0} \frac{\Delta R}{\Delta \lambda}$，$R$ 为反射率；λ 为波长；a 和 b 为回归系数

成像干涉光谱仪信噪比分析公式

金锡哲，向阳，禹秉熙：成像干涉光谱仪信噪比分析。遥感学报，2000，4(3)

(1) 地物反射的波长为 λ 的太阳辐射辐亮度模型：

$$L(\lambda)=\frac{1}{\pi}E(\lambda)\rho(\lambda)$$

式中，$E(\lambda)$，$\rho(\lambda)$ 分别为辐照度和反射率。

(2) 光谱仪入射狭缝上瞬时视场接收的 λ 波长的辐通量模型：

$$\Phi(\lambda)=\tau_0(\lambda)\tau_f(\lambda)\frac{\omega d_2}{f^2}\left(\frac{D}{2}\right)^2\times\left[E(\lambda)\rho(\lambda)\tau_a(\lambda)+\pi L_a(\lambda)\right]$$

式中，f 为焦距；D 为孔径；$\tau_0(\lambda)$ 为光学系统光谱透过率；$\tau_a(\lambda)$ 为沿目标-遥感器路径的大气光谱透过率；$L_a(\lambda)$ 为目标-遥感器路经大气散射的上行光谱辐亮度；d_1 和 d_2 分别为探测器 D 的阵元宽度和高度。

(3) 信噪比模型：

$$S_{NR}=\frac{\lambda_{H}^2\sqrt{2A_D\tau_d\eta_e}}{\Delta\lambda\lambda_L f^2\sqrt{N}}\left(\frac{D}{2}\right)^2\times R_M^2T_fT_c(R_s+T_s)^2\tau_0\tau_a\tau_f\rho\int_{400}^{1000}E(\lambda)D^*(\lambda)\mathrm{d}\lambda$$

式中，R_M，T_f，T_c，R_s，T_s，τ_a，τ_0，τ_f 和 ρ 均为常数；$\Delta\lambda$、λ_L 和 λ_H 分别为谱域带宽、波长下限和波长上限；A_D 为探测器阵元的光敏面积，η_e 为信号过程因子；N 为干涉图采样点数，$D^*(\lambda)$ 为光谱比探测率。

各种噪声估计方法的对比分析

陈秋林，薛永祺：OMIS 成像光谱数据信噪比的估算。遥感学报，2000，4(4)

(1) 半方差函数(γ)模型：

$$\gamma(h)=\frac{1}{2}E\left[z(x_i)-z(x_i+h)\right]^2$$

式中，z 为一维信号值；x_i 为一维坐标值；h 为滞后程差；E 表示求数学期望值。

(2) 噪声方差(σ_n^2)模型：

$$\sigma_n^2=\frac{S^2}{M-4}$$

式中，$S^2=\sum_1^{\omega}\sum_1^{h}r_{i,j,k}^2$；$M=\omega h-1$；$\omega$ 和 h 为图像的宽与高；r 为图像去相关后的残差值。

土壤调整植被指数的计算公式

李宝林：东北平原西部沙丘地近 10 年的沙质荒漠化。地理学报，2001，56(3)

土壤调整植被指数 MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index)能尽量消除土壤的影响，更准确地反映地表植被状况。

$$\mathrm{MSAVI}=\left[2\mathrm{NIR}+1-\sqrt{(2\mathrm{NIR}+1)^2-8(\mathrm{NIR}-R)}\right]/2$$

式中，NIR 为近红外区观测值；R 为红光区观测值。

总光合作用率估计模型

Choudhury B J：利用卫星及辅助数据估计总光合作用率——方法及初步结果，Remote Sensing of Environment, 2001, 75

(1) 冠层总光合作用率和截取辐射量：

一片叶子的总的光合作用率(A_l；μ mol $CO_2\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$)与入射在叶片上的 PAR($F_l$；μ mol photon $m^{-2}\cdot s^{-1}$)的关系式为：

$$A_l(F_l)=A_m\frac{(1+\eta)-[(1+\eta)^2-4\theta\eta]^{0.5}}{2\theta}$$

式中，$\eta=\varepsilon\alpha\frac{F_l}{A_m}$；$A_m=c\left\{\frac{2}{1+\exp[-a(n_l-b)]}-1\right\}$ 是单位面积叶片的最大光合作用率，n_l 是叶片氮含量，a，b 和 c 是从野外观测得到的参数；ε 是量子效率；α 是叶片的 PAR 吸收比；θ 是经验曲率因子。

(2) 散射辐射与总的辐射量间的经验关系模型：

根据在 de Bilt 的每小时测量值对散射比例 f_{dif} (散射部分与总的辐射的比值)与明净度 k (总的辐射量与大气层外辐射的比值)给出下面的分段连续关系式：

$$f_{dif}=1.0 \qquad (k<0.22)$$

$$f_{dif}=1.0-6.4(k-0.22)^2 \qquad (0.22<k<0.35)$$

$$f_{dif}=1.47-1.66k \qquad (0.35<k<K)$$

$$f_{dif}=R \qquad (k>K)$$

式中，$K=\frac{1.47-R}{1.66}$；$R=0.847-1.61\mu_0+1.04\mu_0^2$；$\mu_0$ 是太阳天顶角的余弦值。

(3) 对月平均辐射量，散射比可根据下面的经验

公式计算：

$$f_{dif}=1.0 \qquad (k<0.3)$$

$$f_{dif}=1-2(k-0.3) \qquad (0.3<k<0.7)$$

$$f_{dif}=0.2 \qquad (k>0.7)$$

土壤水分-反射系数

Muller E, Décamps H：土壤水分-反射系数模型。Remote Sensing of Environment, 2001, 76

$$\rho_S(\lambda)=\rho_{SO}(\lambda)\exp[a_S(\lambda)M]$$

式中，$\rho_S(\lambda)$ 是在光谱波段 λ 上湿润土壤的的反射系数；$a_S(\lambda)$ 是在光谱波段 λ 上由于土壤水分 M 导致的反射系数衰减因子；$\rho_{SO}(\lambda)$ 是在波段 λ 上土壤水分含量等于空气干燥度时的土壤的理论反射系数。

宽波段和高光谱植被指数

Broge N H, Leblanc E：利用宽波段和高光谱植被指数估计绿色叶面积指数和冠层叶绿素密度的预测能力和稳定性比较。Remote Sensing of Environment, 2001,762

(1) 基于两个或三个离散波段的植被指数的

叶绿素吸收比指数(I_{car})定义为：

$$I_{car}=R_{ca}\frac{R_{700}}{R_{670}}$$

$$R_{ca}=|(a\times 670+R_{670}+b)|/(a^2+1)^{0.5}$$

$$a=(R_{700}-R_{550})/150$$

$$b=R_{550}-(a\times 550)$$

式中，R_{ca} 是从基线绿色反射率峰值(R_{550})和 700nm 波段反射率(R_{700})跨越的距离。

(2) 三角形植被指数(I_{tv})定义为：

$$I_{tv}=0.5|\det(AB,AC)|=$$
$$0.5[120(R_{NIR}-R_{Green})-200(R_{Red}-R_{Green})]$$

(3) 高光谱植被指数：

红边的参数：

Miller, Hare 和 Wu (1990)利用逆高斯模型描述反射系数 $R(\lambda)$ 对波长的变化关系：

$$R(\lambda)=R_S-(R_S-R_0)\exp\left[\frac{-(\lambda-\lambda_0)^2}{2\sigma^2}\right]$$

式中，R_S 是近红外反射系数曲线的“肩部”，一般在 780~800 nm；R_0 是最小反射系数大致在 670 nm；λ_0 是最小值对应的波长；σ 是高斯形状参数。

(4) 基于连续光谱测量的植被指数：

叶绿素吸收连续指数(I_{cac})定义为：

$$I_{cac}=\sum_{\lambda_1}^{\lambda_n}(\rho_i^c-\rho_i)\Delta\lambda_i$$

式中，$\rho_i^c=\rho_1+i\frac{d\rho^c}{d\lambda}\Delta\lambda_i$。

去连续叶绿素吸收指数(I_{crca})定义为：

$$I_{crca}=\sum_{\lambda_1}^{\lambda_n}\frac{\rho_i^c-\rho_i}{\rho_i^c}\Delta\lambda_i$$

式中，$\rho_i^c=\rho_1+i\frac{d\rho^c}{d\lambda}\Delta\lambda_i$。

NO_2 含量的太阳光谱遥测模型

魏合理，胡欢陵：用太阳光谱遥测大气污染气体 NO_2 的含量。遥感学报，2001，5(3)

(1) 太阳光谱强度模型：

$$I(\lambda)=I_0(\lambda)\tau_{ms}(\lambda)\tau_a(\lambda)\tau_0(\lambda)\exp[-\sigma(\lambda)Nm]$$

式中，I_0 和 I 分别为大气上界和到达地面的太阳光谱辐射；λ 为波长；σ 为 NO_2 的吸收截面；N 为单位面积内垂直气柱中 NO_2 的总含量；m 为大气质量；$\tau_{ms}(\lambda)$和$\tau_a(\lambda)$ 分别为分子散射和气溶胶衰减的透过率；$\tau_0(\lambda)$ 为除 NO_2 外其他分子吸收的透过率。

(2) 仪器记录的信号强度 $V(\lambda)$ 模型：

$$V(\lambda)=V_0(\lambda)F(\lambda)\exp[-\sigma(\lambda)Nm]$$

$$V_0(\lambda)=\int_{\lambda-\Delta\lambda}^{\lambda+\Delta\lambda}I_0(\lambda')\left(1-\frac{|\lambda-\lambda'|}{\Delta\lambda}\right)d\lambda'$$

$$F(\lambda)=K(\lambda)\tau_{ms}(\lambda)\tau_a(\lambda)\tau_0(\lambda)$$

(3) 用最小二乘法拟合 NO_2 的含量 N 模型：

$$N=\frac{1}{m}\frac{\bar{x}\cdot\bar{y}-\overline{xy}}{\bar{x}^2-\overline{x^2}}$$

$$y=\ln[R'(\lambda)]$$

$$R'(\lambda)=C\exp[-\sigma'(\lambda)Nm]$$

$$x=-\sigma'(\lambda)$$

式中，σ' 为 NO_2 差分吸收截面。

第三章　遥感信息处理与分析

冠层受到的净辐射计算公式

Horler D N H, Barber J, Barringer A R：镉和铜处理及水分胁迫对豌豆热发射的影响：受控环境实验。Remote Sensing of Environment, 1980, 10

一个冠层受到的净辐射(R_n)被分为下面的几个成分(Thom,1975)：

$$R_n = C + \lambda E + D + G + J + \mu A$$

式中，C 是冠层失去的垂直方向上的显热；λE 是水分蒸腾消耗的潜热；D 是水平热通量；G 是传输到土壤或根部的热量；J 是以物理方式储存在冠层内的热量；μA 通过光合作用储存的化学热。

作物绿度的计算模型

Badhwar G D, Carnes J G, Austin W W：利用从 landsat 获取的时间曲线对玉米-大豆属性的提取及分类。Remote Sensing of Environment, 1982, 12

$$\rho(t) = \rho_0 \qquad (t < t_0)$$

$$\rho(t) = \rho_0 (t/t_0)^{\alpha} \exp[\beta(t_0^2 - t^2)] \qquad (t \geqslant t_0)$$

式中，$\rho(t)$ 是作物在时间 t 时的绿度，ρ_0 是这个时间的土壤绿度；t_0 是发芽时间；α 和 β 是与特定的作物及环境条件相对应的常数。

二维遥感数据的判别分析模型

麦美华，刘振声：流域地物识别的多谱段遥感数据分析。地理研究，1982，1(2)

根据选择的判别因子 x_1，x_2，…，x_m 的数据进行线性组合，构成一个判别函数：

$$g = \sum_{i=1}^{m} c_i x_i$$

式中，c_i 为判别系数。

根据两个原则确定判别系数的数值：

(1) 要求 A 类和 B 类间的距离最大；

(2) 要求同类地物之间的区别要小。

根据上述两项原则，合起来要使下式最大：

$$I = \frac{(\bar{g}_A - \bar{g}_B)^2}{\sum_{i=1}^{N}(\bar{g}_{B_i} - \bar{g}_A)^2 + \sum_{i=1}^{N}(\bar{g}_{A_i} - \bar{g}_B)^2}$$

根据求极值原理，上式中的系数满足如下方程组：

$$\begin{cases} S_{11}C_1 + S_{12}C_2 + \cdots + S_{1m}C_m = d_1 \\ S_{21}C_1 + S_{22}C_2 + \cdots + S_{2m}C_m = d_2 \\ \quad \vdots \\ S_{m1}C_1 + S_{m2}C_2 + \cdots + S_{mm}C_m = d_m \end{cases}$$

式中，$S_K(K = 1,2,\cdots,m)$ 为第 K 个因子的自相关；$S_{KL}(K \neq L)$ 为第 K 个因子与第 L 个因子之间的互相关；$d_K(K = 1,2,\cdots,m)$ 为第 K 个因子的两类平均差。

农作物判别的曲线模型

Badhwar G D：利用 Landsat MSS 数据对玉米和大豆进行自动分类-Ⅰ 接近收获期的农作物比例估计。Remote Sensing of Environment, 1984, 14

$$\rho(t) = \rho_0 + (\rho_m - \rho_0)(2\beta e/\alpha)^{\alpha/2}(t - t_0)^{\alpha} e^{-\beta(t-t_0)^2}$$

式中，$\rho(t)$ 是农作物的绿度；ρ_0 和 ρ_m 分别是 $\rho(t)$ 的最小值和最大值；α 和 β 分别是与农作物有关的常数和与环境有关的常数；t 是时间；t_0 是农作物出土时间；绿度曲线可以通过其最大值 ρ_m，时间值 $t_p - t_0$，以及宽度值 σ 和斜率参数 α 来刻画其特征，即：$t_p - t_0 = \left(\frac{\alpha}{2\beta}\right)^{1/2}$，$\sigma^2 \approx \frac{1}{\beta}$。

地面温度的计算公式

Vukovic F M：从 HCMM 测量的红外数据获取的表面温度与野外数据的对比。Remote Sensing of Environment, 1984, 15

地面温度可根据普朗克函数的反函数得到：

$$T_g = \lambda_0[\ln(\lambda_1 / N_0 - 1.0)]^{-}$$

式中，T_g 是地面温度；$\lambda_0 = 1251.159$；$\lambda_1 = 14421.587$；N_0 是在给定波谱范围内表面发射的黑体辐射；$N_0 = a'C + b'$，C 是卫星上红外数据的记数；a' 和 b' 是参数。

陆地卫星影像数字处理的环境背景效果增强模型

龚宗龙：津渤地区陆地卫星影像数字处理的环境背景效果分析。地理研究，1984，3(2)

(1) 灰度扩展公式：

$$X' = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \times 255$$

式中，X 为原始影像密度值；X_{min} 和 X_{max} 分别表示该波段内的原始密度最小值和最大值；X' 为线性扩展后的影像密度值。

(2) 局部增强公式：

$$X' = \frac{S'}{S + MAX S'}(X - M) + AM' + (1 - A)M$$

式中，X 是给定点(采样，扫描行)位置的原始像元值；S 是“局部”标准偏差(在 X 点四周的 $N \times N$ 临区内确定)；M 是局部平均值(条件同上)；M' 是期望的平均值；S' 是期望的标准偏差；MAX 和 A 是两个参数(前者是最大增益，后者是管理滤波器均值移动的的参数)。

(3) 最小距离分类的欧儿里得距离判别公式：

$$D\left(X_i, \bar{X}_k\right) = \left[\frac{\sum_i \left(X_{ij} - \bar{X}_{kj}\right)^2}{n}\right]^{\frac{1}{2}}$$

式中，j 是第 4, 5, 6 和 7 波段的序号；n 是波段数；X_{ij} 是待测像元 i 的第 j 波段的密度；$\bar{X}_{kj}$ 是已知类的第 j 波段的均值；$\sum_i \left(X_{ij} - \bar{X}_{kj}\right)^2$ 是待测像元 i 的第 j 波段的亮度值与 k 类第 j 波段的均值之间的方差；$D\left(X_i, \bar{X}_k\right)$ 是待测像元 j 与已知类 k 之间的距离，当距离 $D\left(X_i, X_k\right)$ 的值小于一定的偏差值时，像元 X_i 就被归属于 k 类。

单位面积土壤辐射功率 W 模型

刘国祥：黄淮海平原裸土湿度的红外遥感监测——以河北省曲周县为例．自然资源，1984，4

$$W = \varepsilon \sigma T^4$$

式中，ε 为比辐射率；σ 为波尔兹曼常数；T 为土壤表面温度。

基于遥感数据的地上生物量估计模型

Asrar G, Kanemasu E T, Jackson R D et al：利用遥感数据估计总的地上生物量．Remote Sensing of Environment, 1985, 17

Monteith(1972)证明总的干物质的产出可表示为：

$$M = \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_c \varepsilon_i \varepsilon_s SC$$

式中，M 是总的干生物量；n 是时间指数；ε_c 是光化学效率因子；ε_i 是光合作用有效辐射的吸收比例；ε_s 是处于 P_{AR} 的电磁波谱范围内的能量比例；S 是总的入射太阳辐射；C 是农作物的胁迫指数，它的计算公式如下：

$$C = \frac{E}{E^*} = \frac{\Delta + \gamma^*}{\Delta + \gamma(1 + r_c / r_a)}$$

$$\gamma^* = \gamma(1 + r_c^* / r_a)$$

式中，E 和 E^* 分别是实际蒸散率和潜在蒸散率；γ 是湿度计常数；r_c 是农作物对水蒸气传输的阻力；r_a 是空气动力学阻力；r_c^* 是在水分充足条件下农作物对水蒸气传输的阻力；$\Delta = (e_c^* - e_a^*)/(T_c - T_a)$ 是饱和水蒸气压 e_c^* 和 e_a^* 在冠层温度 T_c 与气温 T_a 处的斜率。

流域径流遥感估算模型

程义，林文盘，彭斌：白河雨洪总量的遥感估算．自然资源，1985，2

(1) 光谱密度函数 $M_{G(i,j)}^A$ 模型：

$$M_{G(i,j)}^A = (2\pi)^{-n/2} |C_A|^{-1/2} \times \exp\left[-\frac{1}{2}(G_{(i,j)} - \overline{G}_A)^T C_A^{-1} (G_{(i,j)} - \overline{G}_A)\right]$$

式中，$M_{G(i,j)}^A$ 为林地光谱密度向量 $G_{(i,j)}$ 产生的概率密度函数；C_A 为林地各光谱密度的协方差矩阵；C_A^{-1} 为 C_A 的逆矩阵；$\overline{G}_A$ 为林地的四维向量均值；n 为光谱密度向量 $G_{(i,j)}$ 的维数；T 为转置矩阵符。

(2) 全流域径流量 R 模型：

$$R = \sum_{1}^{i} P \alpha_i F_i$$

式中，P 为实测流域面雨量；α_i 为径流系数；F 产流面积。

气温和日照区划方法

赵焕辰：东北地区气温和日照区划．地理研究，1985，4(3)

(1) 主成分分析：

把观测点数作为 P，各观测点的资料记作 x。m 个主成分表示为：

$$\begin{cases} X_1 = l_{11}x_1 + l_{12}x_2 + \cdots + l_{1p}x_p \\ X_2 = l_{21}x_1 + l_{22}x_2 + \cdots + l_{2p}x_p \\ \quad \vdots \\ X_m = l_{m1}x_1 + l_{m2}x_2 + \cdots + l_{mp}x_p \end{cases}$$

式中$\sum_{i=1}^{p} l_{ki}^2 = l(k=1,2,\cdots,m)$；$X_1 - X_m$是$m$个主成分；$x_1 - x_p$是$p$个特性值；$l_1 - l_m p$是对应$m$个主成分$m \times p$个特性值的加权系数。

用Jacobi法，求解上述基本方程式的特征值(λ_p)和特征向量(l)。

主成分的的变动对于全变动的比例，即贡献率$V_k(k=1,2,\cdots,m)$以及m个主成分的累积贡献率V_{ck}(用百分比表示)：

$$V = \left(\lambda_k / \sum_{i=1}^{p} \lambda_i\right) \times 100 \qquad V_{ck} = \sum_{k=1}^{m} V_k$$

各主成分同地点的气候要素间的时间变动特性值(因子负荷量)：

$$f_{ij} = \sqrt{\lambda_i} \cdot l_{ij} / \sqrt{s_j}$$

式中，S_j为在第j地点的气候要素(x_j)的方差；l_{ij}为第i主成分在第j地点的特征向量；λ_i为第i主成分的特征值；f_{ij}为x_i和x_j之间的相关系数(即因子负荷量)。

(2) 区划指标的计算：

群平均法计算聚类间的类似度：

$$D_{fg}^2 = \frac{1}{n_f n_g \sum_{r \in cf} \sum d_{rs}^2}$$

式中，d_{rs}^2表示群C_f中的任何个体r和群C_g中的任何个体s之间的欧儿里得距离的平方；D_{fg}^2为群C_f和群C_g间的距离；C_f和C_g合并成新的群C_h，再求C_h同其他群C_1的距离D_{h1}^2时，有$D_{h1}^2 = \frac{n_f}{n_h} D_{f1}^2 - \frac{n_g}{n_h} D_{gl}^2$。

NOAA-CCT 草场产草量分析公式

徐希孺，金丽芳，贺常慕等：利用NOAA-CCT估算内蒙古草场产草量的原理和方法。地理学报，1985, 40(4)

(1) 绿度公式：

$$G = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

式中，G为绿度；$\rho_1 = s(\rho_{v,1} - \rho_{l,1}) - \rho_{l,1}$；$\rho_2 = s(\rho_{v,2} - \rho_{l,2} + \tau_v^2 s \rho_{l,2}) + \rho_{l,2}$；$\rho$代表反射率，$\tau_v$代表透过度；$s$代表叶面覆盖度，脚标1和2分别代表通道数，脚标$v$代表植被光谱量，脚标$l$代表土壤光谱量。

(2) 标准差：

$$ND = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

式中，ND为标准差。

(3) 卫星信息的特征：

$$N_\lambda = K_\lambda \left(\frac{E_\lambda}{\pi} \rho_\lambda T_\lambda + L_{s,\lambda} \right)$$

式中，N_λ为卫星传感器的输出数据(卫星传感器所测得的亮度值)；E_λ为地面辐照度；ρ_λ为地面反射率；T_λ为大气透过率；$L_{s,\lambda}$为大气路径辐射；K_λ为仪器转换常数；脚标λ为通道数。

L-波段土壤发射率与土壤水分含量的关系模型

Stroosnijder L, Lascano R J, Van Bavel C H M et al：L-波段土壤发射率与土壤水分含量的关系。Remote Sensing of Environment, 1986,19

通过数值模拟得到的L-波段土壤发射率(E)与土壤水分含量(M)的关系为：

$$M(0 \sim 2) = 3.96 - 14.43E + 20.24E^2 - 10.12E^3$$

$$(r^2 = 0.98)$$

式中，$M(0\sim2)$是土壤表2cm内的体积水分含量，$M(0\sim2)$和E是通过CONSERVB模型模拟得到的30天的值。

SIR-A 图像的灰度值与土壤复介电常数的关系模型

Liu J, Teng X, Xiao J：应用航天飞机成像雷达数据进行土地利用调查。Remote Sensing of Environment, 1986, 19

(1) 实验表明在SIR-A图像的灰度值G与土壤的复介电常数(实部为ε'，虚部为ε'')和土壤水分M_s间存在相关性，其回归方程为：

$$G = 3.4446 + 0.4582\varepsilon'$$

$$G = 2.4391 + 18.8474\varepsilon''$$

$$G = 4.0589 + 8.8537M_s$$

(2) 土壤的复介电常数的实部ε'与土壤孔隙度P和土壤水分M_s之间的关系为：

$$\varepsilon' = e^{P \cdot \ln \varepsilon_0' + M_v \cdot \ln \varepsilon_w'}$$

式中，ε_0' 是在干燥条件下土壤复介电常数的实部；ε_w' 是水的复介电常数的实部。

绿色因子的计算模型

Badhwar G D, Gargantini C E, Redondo F V：阿根廷夏季农作物的 Landsat 分类．Remote Sensing of Environment, 1987, 21

绿色因子 $\rho(t)$：

$$\rho(t) = \rho_0 + (\rho_m - \rho_0) \times \frac{2\beta_c}{\alpha}(t - t_0)^{\alpha} \exp[-\beta(t - t_0)^2] \quad ①$$

式中，ρ_0 是土壤的绿色因子；t_0 是农作物出土时间；ρ_m 是绿色因子的最大值；在峰值时间 $t_p = \sqrt{\alpha / 2\beta}$ 时达到。这个时间变化图的宽度定义为方程①的两个拐点对应时间的差，其计算公式可表达为 $\tau^2 = \frac{1}{2\beta} - \frac{\alpha}{2\beta}\left[1 - \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)^{1/2}\right]$。

两场降雨范围模式之间吻合度的交叉相关模型

Tsonis A A：在中纬度区根据 GEOS 图像确定降雨强度及类型．Remote Sensing of Environment, 1987, 21

任意两场降雨的范围模式之间的吻合度可用两者的交叉相关来确定：

$$\gamma = \frac{1}{NS_1S_2}\iint[P_1(x,y) - \overline{P}_1] \cdot [P_2(x,y) - \overline{P}_2]\mathrm{d}x\mathrm{d}y$$

式中，γ 是 $P_1(x,y)$，$P_2(x,y)$ 之间的交叉相关（$0 \leqslant \gamma \leqslant 1$）；$N$ 是积分区域，其必须包括两个模式，$P_1(x,y)$ 和 $P_2(x,y)$ 是所考虑的降雨模式的空间分布；$\overline{P}_1$，$\overline{P}_2$ 分别是场 $P_1(x,y)$ 和 $P_2(x,y)$ 在区域 N 上的平均值，S_1，S_2 分别是 $P_1(x,y)$ 和 $P_2(x,y)$ 在区域 N 上的标准偏差。

冠层反射系数 *CR* 计算模型

Goel N S, Toby Grier：利用仅有 4 个观察方向的反射系数数据估计成行种植植物冠层的参数．Remote Sensing of Environment, 1987, 21

$$CR = a\theta_V^2 + b\theta_V\cos(\psi_S - \psi_{ROAZ})\cos(\psi_V - \psi_{ROAZ}) + d\theta_V\sin(\psi_S - \psi_{ROAZ})\sin(\psi_V - \psi_{ROAZ}) + c$$

式中，θ_V 是视顶角；ψ_S 和 ψ_V 分别是太阳方位角和视方位角；ψ_{ROAZ} 是行方位角；a, b 和 c 是间接依赖于太阳方向和冠层参数的常数。

大沙漠中植被的季节及年季变化的关系模型

Choudhury B J, C J Tucker：喀拉哈里沙漠、维多利亚大沙漠、桑迪大沙漠中植被的季节及年季变化的卫星观察(1979-1984)．Remote Sensing of Environment, 1987, 23

(1) 垂直和水平极化方向亮度温度差 ΔT 的表达式：

$$\Delta T = T_0(R_s^H - R_s^V)\Gamma(\Gamma + \omega - \omega\Gamma)$$

式中，T_0 是表面温度；R_s^H 和 R_s^V 分别是土壤在水平和垂直极化方向上的反射率；ω 是植被的单重散射漫反射率；Γ 是植被的单向透射率。

(2) Γ 与冠层绿色叶面积指数(L)有下面的关系：

$$\Gamma = \exp(-0.75L/\mu)$$

式中，μ 是入射角的余弦值。

(3) Choudhury et al. (1987) 得到了 Γ 关于植被水分含量 W 的的表达式：

$$\Gamma = \exp(-12W)$$

(4) 根据野外观察，小麦的归一化差植被指数(ND)与冠层叶面积指数(L)有以下关系：

$$ND = 0.92[1 - 0.83\exp(-0.96L)]$$

森林生物量和体积的机载激光雷达数据估计模型

Nelson R, Krabill W, Tonelli J：利用机载激光雷达数据估计森林生物量和体积．Remote Sensing of Environment, 1988, 24

激光测量值与地面测量的生物量与体积的关系式为：

$$\ln V_{TT} = mX_{LHM} + nY_{LCDM} + b$$

或：

$$\ln V_{TT} = mX_{LHM} + n\ln Y_{LCDM} + b$$

式中，V_{TT} 等于考察区内树木的总体积；m,n,b 是回归系数；X_{LHM} 为激光高度米制(laser height metric)；Y_{LCDM} 为激光冠层密度米制(laser canopy density metric)。

微波极化差指数与归一化差植被指数的相关灵敏度模型

Becker F, Choudhury B J：植被与荒漠化监测的微波极化差指数与归一化差植被指数的相关灵敏性研究．Remote Sensing of Environment, 1988, 24

(1) 在局部尺度上：

$$I_{ndv}=I_{ndvo}+(I_{ndvm}-I_{ndvo})(1-e^{-h\alpha})$$

式中，α 是叶绿素含量指标，如 I_{la}；h 是近红外辐射的透射率；I_{ndvo} 和 I_{ndvm} 分别是裸地和完全植被覆盖的 I_{ndv}。

(2) 在大尺度上：

$$I_{ndv}=I_{dnv}+(I_{ndvm}-I_{ndvo})(1-e^{h\alpha'})$$

式中，α' 和 h 分别是大尺度下的参数；I_{ndvo} 和 I_{ndvm} 是有效大尺度参数。

(3) 微波极化差植被指数：

$$I_{mpd}=\frac{20\Delta T'}{T_H+T_V}$$

式中，$\Delta T'=(1-c)\Delta T_s+c\Delta T$，$T_s$ 是土壤湿度，c 是覆盖比例，T_H 和 T_V 分别是水平极化方向与垂直极化方向上的亮度温度。

(4) I_{mpd} 与 N_{DVI} 之间的简单关系模型：

$$I_{mpd}=(I_{mpdm}-I_{mpdo})\times\left(\frac{I_{ndvm}-I_{ndv}}{I_{ndvm}-I_{ndvo}}\right)^{2\gamma}+I_{mpdo}$$

式中，I_{mpdm} 是 I_{mpd} 的最大值；I_{mpdo} 是 I_{mpd} 的最小值；$\gamma=m/h$，m 是依赖于植物水分、土壤养分及物种的系数。

森林生态的数字地形模型

陈镔生，方有清：用森林生态环境信息进行遥感图像分类的专家系统初探 环境遥感，1988，3(1)

坡度：

$$S=\sqrt{p^2+q^2}$$

坡向：

$$A=\begin{cases}\frac{\pi}{2}+A' & (p>0)\\ \frac{3\pi}{2}+A' & (p<0)\end{cases}$$

式中，
$$\begin{cases}p=\frac{\partial z}{\partial x}=(z_{i,j}+z_{i+1,j}-z_{i,j+1}-z_{i-1,j+1})/2\Delta x\\ q=\frac{\partial z}{\partial y}=(z_{i+1,j}+z_{i+1,j-1}-z_{i,j}-z_{i,j+1})/2\Delta y\end{cases};$$

$A'=\arctan(q/p)$ 是坡向 A 与 X 轴的夹角，$0<A'<\frac{\pi}{2}$。

目标函数模型

谈正，杜春华：计算机自动识别分类技术在森林遥感中的应用 环境遥感，1988，3(1)

$$J_m(u,v)=\sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c}(u_{ik})^m\|X_k-V_i\|^2 \qquad (m>1)$$

式中，$u_{ik}=\dfrac{1}{\sum_{j=1}^{c}\left(\frac{d_{ik}}{d_{jk}}\right)^{\frac{1}{m-1}}}$，$\begin{pmatrix}i=1, & c;\\ k=1, & c;\end{pmatrix}$，$u_{ik}$ 为隶属度；$V_i=\dfrac{\sum_{k=1}^{n}(u_{ik})^m\cdot X_k}{\sum_{k=1}^{n}(u_{ik})^m}$，$(i=1,\ c)$，$V_i$ 为类别中心均值的特征矢量。

马尔可夫平稳随机域模型

曹小明，方有清：马尔可夫平稳随机域模型与遥感图像空间邻域结构信息分析，环境遥感，1988，3(1)

1. 平面点阵马尔可夫过程域邻域结构理论模型

(1) 平面点阵马尔可夫过程模型 I：

$$E(X_{s,t}/X_{m,n}^{s,t})=\sum\sum\alpha_{uv}X_{s-1,t-v}+\varepsilon_{uv}$$

(2) 平面点阵马尔可夫过程模型 II：

$$\rho_{s,t}=K\int_{-\pi}^{\pi}\int_{-\pi}^{\pi}\frac{\cos s\theta_1\cos t\theta_2}{1-2a\cos\theta_1-2b\cos\theta_2}d\theta_1 d\theta_2$$

式中，$2|a|+2|b|<1$；$\rho_{s,t}$ 为相关系数。

(3) 平面点阵马尔可夫过程模型 III：

$$\rho_{s,t}=K\int_{-\pi}^{\pi}\int_{-\pi}^{\pi}\frac{1}{A}\cos s\ \theta_1\cos t\ \theta_2 d\theta_1 d\theta_2$$

式中，$A=1-2a\cos\theta_1+2b\cos\theta_2+4c\cos\theta_1\cos\theta_2$

2. 邻域结构分类方法

正规化模式：

$$\varepsilon_{ij}=\frac{X_{ij}-m_{ij}}{D_{ij}}$$

式中，X_{ij} 为点随机变量；m_{ij} 为其均值；D_{ij} 为标准差。

雪线高度模型

陈贤章：从卫星遥感资料中提取雪盖信息的探讨 环境遥感，1988，3(2)

$$x = H_m + \frac{(H_n - H_m)d_1}{d}$$

式中，x 为所求点的高程；H_m和H_n 分别为低值和高值等高线高程；d_1 为所求点到低值等高线的距离；d 为两根等高线间距。

遥感图像自动识别与分类模型

王蓓：遥感图像自动识别与分类的试验研究．环境遥感，1988，3(2)

1．试验所用资料及其预处理

(1) 土壤亮度指数模型：

$$S_{B1} = \sum_{i=1}^{4} R_{i1} X_i$$

(2) 植被绿度指数模型：

$$V_{G1} = \sum_{i=1}^{4} R_{i2} X_i$$

上述两式中，R_{ij} 为 KL 变换阵的元素；X_i 为 4 个波段的原始光谱值。

(3) 土壤投影亮度模型：

$$P_{SB} = \begin{cases} 0 & (G > G_T) \\ \dfrac{B_F G - G_F B}{G - G_F} & (其他) \end{cases}$$

式中，G 和 B 分别为(1),(2)两式所确定的亮度和绿度值；G_F 和 B_F 分别为试验过程中通过 PAV 的绿度和亮度值；G_T 为绿度值值域。

2．模糊分类

不同土类的模糊数学模型：

$$A_i = \bigcap_{j=1}^{p} A_{ij} \quad \begin{pmatrix} i = 1,2,\cdots,n是类别数目 \\ j = 1,2,\cdots,n是波段数目 \end{pmatrix}$$

纹理模型和纹理识别模型

袁建星，万嘉若，王成道：纹理模型和纹理识别．环境遥感，1988，3(2)

(1) 回归模型的假设检验：

$$S_{总} = \sum_{t=p+1}^{n} (x_t - \hat{x})^2 + \sum_{t=p+1}^{n} (x_t - \bar{x})^2 = S_{剩} + S_{回}$$

式中，$\hat{x}_t = \alpha_1 x_{t-1} + \alpha_2 x_{t-2} + \cdots + \alpha_p x_{t-p}$，

$(t = p+1,\cdots,n)$；$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n} x_t$；$S_{总}$ 为 x 的总偏差平方和；$S_{剩}$ 为剩余平方和；$S_{回}$ 为回归平方和。

(2) 自相关纹理特征抽取：

自相关系数模型：

$$\alpha_i = \frac{n}{(n-i)s} \sum_{t=i+1}^{n} x_t x_{t-i} \quad (i = 1,2,\cdots,p)$$

式中，$s = \sum_{t=1}^{n} x_t^2$。

森林蓄积量的估测模型

李芝喜：多级遥感清查森林资源的研究．环境遥感，1988，3(3)

(1) 随机不等概抽取一阶样本单元模型：

$$n = \frac{t^2 \cdot c^2}{E^2}(1 - \rho^2)$$

式中，c 为一阶单元间的有林地变异系数约为 0.75；ρ 为卫星图像与航空像片有林地判读值之间的相关系数，约为 0.8；t 为可靠性指标；E 为相对误差。

(2) 总体森林蓄积量的估测模型：

$$V = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{p_i m_i} \sum_{j=1}^{m_i} \frac{1}{p_{ij} t_{ij}} \sum_{k=1}^{t_{ij}} \frac{V_{ijk}}{p_{ijk}}$$

式中，V_{ijk} 为第三阶样本单元蓄积量测定值；p_i 为第 i 个一阶样本单元的抽取概率；p_{ij} 为第 i 个一阶单元内抽取的第 j 个二阶样本单元的条件概率；p_{ijk} 为已经抽取的第 i 个一阶样本单元第 j 个二阶样本单元中，抽取第 k 个三阶样本单元的条件概率；n，m_i 和 t_{ij} 分别为第一、二、三阶的样本大小。

利用 TM 资料对湖泊和滩地调查的理论模型

王廷颐，张妙玲，俞纯绅：利用 TM 资料对里下河地区的湖泊和滩地进行调查的几个技术问题．环境遥感，1988，3(3)

(1) N 个地块的相对误差模型：

$$S_R = \sqrt{\frac{R^3}{12}} \sum_{i=1}^{N} \sqrt{L_i} \Big/ \sum_{i=1}^{N} A_i = \sqrt{\frac{R^3}{12}} \cdot \frac{\sqrt{L}}{A}$$

式中，R 为分辨率；L 为地块周长；A 为地块面积。

(2) 欧氏距离(d)模型：

$$d = \sum_{k=1}^{m} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N} (\alpha_{i\alpha_R} - x_{j\alpha_R})^2$$

式中，α 为误差置信度；$x_{j\alpha_R}$ 为第 j 波段第 α_R 地类密度值。

定义相似程度的计算模型

倪焱：灰色系统理论在航空像片模式识别中的应用。环境遥感，1988，3(3)

(1) 绝对误差$\Delta_{0j}(t)$模型：

$$\Delta_{0j}(t)=\left|X_0(t)-X_j(t)\right|$$

$$j=1,2,\cdots,m;\ t=1,2,\cdots,n$$

(2) 最小绝对误差$\Delta_{\min}$模型：

$$\Delta_{\min}=\min_j\min_t\left|X_0(t)-X_j(t)\right|$$

(3) 最大绝对误差$\Delta_{\max}$模型：

$$\Delta_{\max}=\max_j\max_t\left|X_0(t)-X_j(t)\right|$$

(4) 关联系数$\xi_{0j}(t)$模型：

$$\xi_{0j}(t)=\frac{\Delta_{\min}+b\Delta_{\max}}{\Delta_{0j}(t)\cdot\left(\frac{b}{a}-1\right)+\Delta_{\max}},$$

$$j=1,2,\cdots,m;\ t=1,2,\cdots,n$$

式中，$\xi_{0j}(t)\in[a,b]$，a和b均为实数，且$a<b$。

(5) $X_0(t)$与$X_j(t)$的关联度γ_{0j}模型：

$$\gamma_{0j}(t)=\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}\xi_{0j}(t),\quad j=1,2,\cdots,m;\ t=1,2,\cdots,n。$$

两维接边选择方法和彩色图像的镶嵌模型

李丽，杨世仁，高朋：数字镶嵌中的两维接边选择和彩色图像的镶嵌——IRSA-2遥感图像处理系统之五。环境遥感，1988，3(4)

(1) 垂直V_k和水平H_k接边的灰差和模型：

$$V_k=\sum_{i=-\frac{u}{2}}^{\frac{u}{2}}d_{j,k+i}$$

$$H_k=\sum_{i=-\frac{u}{2}}^{\frac{u}{2}}d_{j+i,k}$$

(2) 加权绝对灰差和图像的像元$d_{j,k}$模型：

$$d_{j,k}=\sum_{i=1}^{3}a_{i,j,k}\left|f_{i,j,k}-g_{i,j,k}\right|$$

式中，f，g分别为左、右图像的像元灰度值；$a_{i,j,k}$为加权系数；$a_{i,j,k}=\alpha\dfrac{f_{i,j,k}+g_{i,j,k}}{2}$。

松树林冠层的短时热响应的测量模型

Luvall J C, Holbo H R：利用热扫描器获得数据对松树林冠层的短时热响应的测量。Remote Sensing of Environment, 1989, 27

(1) 热惯量(P)：

$$P=(1/\rho c\lambda)^{0.5}$$

式中，ρ是密度；c是热容量；λ是热导。

(2) 热响应数：

$$\mathrm{TRN}=\frac{\sum_{t_1}^{t_2}(R_n\Delta t)}{\Delta T}$$

(3) 每种表面类型的平均多边形温度：

$$T=\frac{\sum T_p}{n}$$

式中，$\sum_{t_1}^{t_2}(R_n\cdot\Delta t)$是两次飞行时间$t_1$和$t_2$间考察地点的总净辐射；$\Delta t$是两次飞行间的时间间隔，$T$是表面温度(空间平均)；$T_p$是像素的温度；$n$是在这个表面类型包含的像素数目；$\Delta T$是同样的时间间隔内表面温度差。

(4) 净太阳辐射：

$$K^*=(1-\alpha)\phi(K\downarrow)$$

(5) 净长波辐射：

$$L^*=L\downarrow-\varepsilon[\sigma(T)^4]$$

(6) 净全波长辐射：

$$R_n=K^*+L^*$$

式中，$K\downarrow$是入射太阳辐射的测量值；ϕ是与空间位置有关的太阳辐射获得系数；α是空间位置的漫反射率；$L\downarrow$是入射长波辐射测量值；ε是表面发射率；σ是Stefan-Boltzmann常数；T是平均表面温度。

地形对遥感数据影响的评估模型

Proy C, Tanrè D, Deschamps P Y：地形对遥感数据的影响评估。Remote Sensing of Environment, 1989, 30

(1) 直接太阳辐射：

令E_S为穿过大气层后到达地面的直接辐照度，一

个像素接收到的辐射 E_{S_t} 为：

$$E_{S_t} = E_S \cos(N, S) \qquad (\cos(N, S) > 0)；$$

$$E_{S_t} = 0 \qquad (\cos(N, S) < 0\ (自遮蔽))$$

式中，N 是地形的法向方向；S 是太阳方向角。

(2) 漫射太阳辐射

对山区地形中每一个像素，天空散射的辐射 (E_D) 用水平地面值 E_H 估计：

$$E_D = E_H \cdot g$$

通常可用两个公式来估计 g：

Kondratyev(1977)：

$$g = \frac{1 + \cos P}{2}$$

Temps 和 Coulson(1977)：

$$g = \left(\frac{1 + \cos P}{2}\right)(1 + \sin^3 \theta_0 \cos^2 I) \cdot (1 - \sin^2 P / 2)$$

式中，P 在两个式子中都等于地形的坡度；θ_0 是太阳的仰角；$\theta_0 = \pi/2 - \theta_S$；$\theta_S$ 是太阳的顶角。

E_D 可用另外一个公式表示：

$$E_D = E_{\max} \frac{\cos I}{\cos \theta_S} + E_{iso} \frac{1 + \cos P}{2}$$

式中，$E_{\max}$ 是太阳周边部分，可视为直接辐射的附加成分；E_{iso} 是由于漫射辐射导致的各向同性部分。

标准概率松弛方法的性能分析模型

Gong P, Howarth P J：土地覆盖分类的概率松弛方法的性能分析. Remote Sensing of Environment, 1989, 30

(1) 概率松弛方法：

把 N 个数字图像的像素归到 m 个类别 $(c_1, c_2, \cdots, c_m)$ 中，像素 i 属于类别 c_j 的概率定义为 $P_i(c_j)$，松弛方法即利用了预定义的邻近像素的概率信息来迭代产生每个像素的新的概率。像素 i 属于类别 c 的第 $k+1$ 次迭代的概率通过下面的规则得到：

$$P_{i,k+1}(c) = \frac{P_{i,k}(c)[1 + q_{i,k}(c)]}{\sum_{j=1}^{m} P_{i,k}(c_j)[1 + q_{i,k}(c_j)]}$$

式中，k 表示迭代次数，$k = 0$ 表示利用简单分类方法得到的初始概率；项 $q_{i,j}(c)$ 表示校正因子，或领域算符，表示所有预定义的邻近像素对像素 i 的影响；$q_{i,k}(c) = \sum_{j=1}^{n} w_{ij} \sum_{c_j = c_1}^{c_m} r_{ij}(c, c_j) P_{j,k}(c_j)$，$n$ 是预定义的邻近像素的数目，ω_{ij} 是邻近像素 j 对 i 影响的权重因子，项 $r_{ij}(c, c_j)$ 是像素 i 在类别 c 与邻近像素 j 在类别 c_j 之间的相容系数。

(2) 在修正的概率松弛方法中，权重因子修正为下面的形式：

$$w_{ij} = a_j S_j / \sum_{k=1}^{n} a_k S_k$$

式中，S_j 是像素 j 的确定性指标；下标 k 表示像素 i 的所有邻近像素；a 是标准权重因子。

遥感信息与地理数据复合的数学模型

王野乔，赵华昌：遥感信息与地理数据的复合研究——以区域农业气候资源研究为例. 环境遥感，1989，4(1)

(1) 两种信息复合的设计——综合信息 $S(x,y)$ 模型：

$$S(x, y) = R(x, y) + G(x, y)$$

(2) 地理数据的采集与推求：

$$A_{ij} = 1812 - 1.134(h_{ij} - h_0) + i \times 0.076 (℃)$$

$$F_{ij} = 976 + 0.83(h_{ij} - h_0) + j \times 0.0196 (mm)$$

$$i, j = 1, 2, \cdots, 112$$

式中，A_{ij}、F_{ij} 分别为各格网单元的 ≥10℃ 积温和年降水量的推求值；h_{ij} 为第 (i, j) 格网单元的高程值；h_0 为参考点高程值；i、j 分别为从参考点算起的各格网单元的经、纬向排列序数。

冬小麦遥感估产模型

未保本：冬小麦产量构成分析与遥感估产. 环境遥感，1989，4(2)

(1) 冬小麦的反射率模型：

$$\rho_1(\lambda) = \frac{V_1}{V_0} \rho_0(\lambda)$$

(2) 光谱参数 I_{pv} 模型：

$$I_{pv} = \rho_{IR} \cos\theta - \rho_R \sin\theta$$

式中，$\rho_R = \rho_{V,R} \cdot x + (1 - x) \cdot \rho_{S,R}$ 为红光波段混合光谱反射率，下标 R 为红光波段，V 为冬小麦，S 为土壤，x 为冬小麦的覆盖度；$\rho_{IR} = \rho_{V,IR}(n) \cdot x + (1 - x) \cdot \rho_{S,IR} +$

$\tau \cdot \tau_{V,IR}^{2n} \cdot \rho_{S,IR}$ 为近红外波段混合光谱反射率；IR 为近红外波段；$\tau_{V,IR}$ 为单片叶子的透过率；n 为平均叶片的重叠数；$\rho_{V,IR}(n)$ 表示叶子在近红外波段的反射率为叶片重叠数的函数。

植被信息恢复模型

王铮，梅安新，刘树人等：利用计算机从遥感图像识别植被类型的理论研究．植物生态学与地植物学学报，1989，13(2)

(1) 规范差 ND 模型：

$$ND = \frac{\rho_n - \rho_r}{\rho_n + \rho_r}$$

式中，ρ_n 和 ρ_r 分别为近红外和红光波段反射率。

(2) 波段比 R 模型：

$$R = \frac{2}{1 - ND} - 1$$

计算冬小麦种植面积的两种方法

肖乾广：用 NOAA 气象卫星 AVHRR 的定量资料计算冬小麦种植面积的两种方法．环境遥感，1989，4(3)

(1) 严格的 AVHRR 各个通道的计算公式为：

$$NS_i(z,\phi;\theta',\phi') = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda)\cdot\{E(z,\lambda)R'[I(\theta',\lambda)+L']\}\mathrm{d}\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda)\mathrm{d}\lambda}$$

式中，$R' = R(z,\phi;\theta',\phi',\lambda)$，$L' = L_{\text{path}}(z,\phi;\theta',\phi',\lambda)$

(2) 任意像元的绿度指数模型：

$$G(t) = a\alpha + bG_s(t)$$

式中，α 为像元中的麦土比；G_s 为满像元都是冬小麦时的长势绿度值；a、b 为常数。

植被指数的大气及视角校正模型

Paltridge G W，Mitchell R M：植被指数的大气及视角校正以及从 NOAA/AVHRR 数据获取草地可燃物水分含量．Remote Sensing of Environment，1990，31

(1) 比植被指数(I_{rv})表示为：

$$I_{rv} = K_1 / K_2$$

式中，K_i 表示 NOAA 提供的 AVHRR 波段 i 的校正值；I_{ndvG} 和 I_{rvG} 是地面仪器观测到的 I_{ndv} 和 I_{rv}；R_i 是直接在地面观测的反射率；$I_{ndvG} = (R_2 - R_1)/(R_2 - R_1)$；$I_{rvG} = R_1 / R_2$

(2) 从卫星观测值 K_i 计算 R_i 的简单公式为：

$$R = \frac{K(1-M) - \sec\phi_s \sum_{i=0}^{1} \Phi_i Q_i(m)}{4\cos\theta\, g(m) e^{-m\tau}(1+m\tau)}$$

式中，R 是表面双向反射率；K 是 AVHRR 测量的漫反射率；M 是 P 中分子多重散射的比例；$Q_0(m)$ 和 $Q_1(m)$ 分别是与分子和气溶胶散射相关项的积分；Φ_0 和 Φ_1 分别是分子散射和气溶胶散射的相函数；ϕ_s 是卫星天顶角；θ 是太阳天顶角；m 是从太阳到地面再到卫星的总的大气质量；τ 是气溶胶垂直光学厚度

基于最大似然分类法的面积估计改进模型

Maselli F, Conese C, Zipoli G et al：利用误差概率改进基于最大似然分类法的面积估计．Remote Sensing of Environment，1990，31

(1) 最大似然度法的判别函数：

$$F = (X - M)'C^{-1}(X - M) + \ln|C|$$

式中，F 是判别函数；X 是数据谱段中考察像素相应的数据矢量；M 是类型 i 在所有数据谱段上的平均矢量；C 是类型 i 的方差-协方差矩阵。

(2) 误差概率估计与修正分类方法：

$$Cp(i,j) = E(i,j)/[E(i,i) + E(i,j)]$$

$$Op(j,i) = E(j,i)/[E(i,i) + E(j,i)]$$

式中，$Cp(j,i)$ 是类型 i 相对于类型 j 的委托误差概率；$Op(i,j)$ 是类型 i 相对于类型 j 的忽略误差概率；$E(i,j)$ 是误差矩阵的矩阵元。

(3) 对给定的某个像素，如果 P 是某类型中某个元素的修正判别的优先概率，可以根据最大似然度等效于使判别函数最小化而把这个像素归于这个类型：

$$F = (X - M)'C^{-1}(X - M) + \ln|C| - 2\ln P$$

根据这个理论，修正的最大似然度分类法即是使下面函数最小化：

$$F = (X - M)'C^{-1}(X - M) + \ln|C| - 2\ln Op(i,j) + 2\ln Cp(i,j)$$

式中，i 是初始分配的类型组；j 是目前考察的类型组。

24 小时蒸散量的计算模型

Thunnissen H A M, Nieuwenhuis G J A：从热红外数据估计区域 24 小时蒸散量的的简化方法．Remote Sensing of Environment，1990，31

$$LE^{24} = LE_p^{24} - B'(T_c - T_c^*)$$

式中，LE^{24} 是 24 小时蒸散量；LE_p^{24} 是 24 小时可能蒸散量；T_c 是农作物温度；T_c^* 是参考农作物温度，即在最佳光学、土壤水分条件的值；B' 是经验常数.

小麦的谱响应及其与农业变量的关系模型

Rudorff B F T, Batista G T：热带区域中小麦的谱响应及其与农业变量的关系 Remote Sensing of Environment, 1990, 31

(1) 谱数据传输：

研究中选取了以下波段：EST1 (756~780 nm)、EST2 (661~673 nm)、EST3 (756~780 nm) 和 EST4 (786~823 nm)；这些波段分别位于小麦在可见光区的反射峰(EST1)和吸收峰(EST2)，以及在近红外区的两个反射峰(EST3 和 EST4)，并选取了以下的植被指数：

$$\mathrm{IVEST} = (\mathrm{EST1} + \mathrm{EST4})/\mathrm{EST2}$$

$$\mathrm{ND} = (\mathrm{EST4} - \mathrm{EST2})/(\mathrm{EST4} + \mathrm{EST2})$$

式中，通过对植被指数 ND 在整个生长周期进行积分，可求得累积植被指数(IND)。

(2) IND 与最终产出的关系可表示为：

$$Q_{\mathrm{estimated\ yield}} = 474 + 491 \times \mathrm{IND} \quad (r^2 = 0.66)$$

农田表面能量平衡的分析模型

Kustas W P, Moran M S, Jackson R D et al：干旱环境中利用遥感及参照点方法对农田表面能量平衡的瞬时值及每日值的研究 Remote Sensing of Environment, 1990, 32

(1) Gash(1987)将表面温度的水平变化与其他表面及气象条件的变化联系起来：

$$LE = LE_r + [(1-c_r)\alpha_{sr} - (1-c)\alpha_s + c_r - c]R_s - \sigma\varepsilon_s[(1-c)T_s^4 - (1-c_r)T_{sr}^4] - \frac{\rho C_p}{r_{ahr}(T_s - T_{sr})}$$

式中，LE 是蒸发通量；R_s 是入射太阳辐射；α_s 是表面漫反射系数；σ 是 Stefan-Boltzmann 常数；ε_s 是表面发射率；c 是植被指数的函数；T_s 是表面温度；ρ 是空气密度；C_p 是定压热容量；r_{ah} 是热传导的体积阻力；下标 r 表示参照值。

(2) 日蒸发通量(LE_d)与日中瞬时通量之间的关系模型：

$$LE_d = 0.58R_{ni} - 0.33G_i - 1.1H_i\left(\frac{0.33R_{ni} - 0.3G_i}{R_{ni} - G_i}\right) \approx \frac{1}{3}(LE_i)$$

式中，下标 i 表示瞬时日中值；R_n 是净辐射；G 是土壤热量通量密度；H 是显热通量密度

FCM 分类方法

Fisher P F, Pathirana S：郊区土地覆盖类型的模糊隶属度的估值 Remote Sensing of Environment, 1990, 34

一个给定的数据集合 Y 的 U 可给为：

$$J_m(U,v) = \sum_{i=1}^{\mathrm{row}}\sum_{j=1}^{\mathrm{col}}\sum_{k=1}^{c}(u_{ijk})^m \|y_i - v_k\|_A^2$$

式中，$Y = \{y_{11}, y_{12}, \cdots, y_{\mathrm{row\cdot col}}\} \subset R^{\mathrm{row\cdot col}}$ = 数据；c 是识别的簇的数目，$2 \leqslant c \leqslant n$；$m$ 是权重指数，$1 \leqslant m \leqslant \infty$；$U$ 是 Y 的模糊 c-区分，$U \subset M_{fc}$；$v = (v_1, v_2, \cdots, v_c)$ = 簇中心的矢量；$v_k = (v_{k1}, v_{k2}, \cdots, v_{kn})$ = 簇 k 的中心；$\|\ \|_A$ 表示对 $R^{\mathrm{row\cdot col}}$ 以 A 取模；A 定义为正的(row.col× col)权重矩阵.

波浪波长和方向提取的图像纹理分析模型

徐建华，郑君伟：波浪波长和方向的提取的图像纹理分析技术 环境遥感，1990，5(4)

1. 波长信息的提取

(1) 波形变换模型：

$$\{x_k\} \to \{y_k\}$$

$$(k = 1,2,\cdots,m)$$

$$y_{k+1} = \begin{cases} x_{k+1} - T/2 & (y_k < x_{k+1} - T/2) \\ y_k & (x_{k+1} - T/2 < y_k < x_{k+1} + T/2) \\ x_{k+1} + T/2 & (x_{k+1} + T/2 < y_k) \end{cases}$$

(2) 纹理特征向量模型：

$$F = \left[L_{1,2}^* L_{1,3}^* \cdots L_{1,l}^*, L_{2,3}^* L_{2,4}^* \cdots L_{l-1,l}^*\right]^T$$

式中，$L_{i,j}^* = L(T_i)/L(T_j)$，$(i,j = 1,2,\cdots,l$ 且 $i \neq j)$；$L(T)$ 为纹理测度。

2. 海浪方向信息的提取

(1) 灰度共生矩阵：

$[P(i,j,d,\theta)]$ $(\theta = 0°, 45°, 90°, 135°)$ 模型：

$$P(i,j,d,0°) = \#\{(k,l),(m,n) \in (L_y \times L_x) \times (L_y \times L_x) \mid k-m=0, |l-n|=d; f(k,l)=i, f(m,n)=j\}$$

$$P(i,j,d,45°) = \#\{(k,l),(m,n) \in (L_y \times L_x) \times (L_y \times L_x) \mid (k-m=d, l-n=d) \text{或} (k-m=-d, l-n=-d); f(k,l)=i, f(m,n)=j\}$$

$$P(i,j,d,90°)=\#\{(k,l),(m,n)\in(L_y\times L_x)\times(L_y\times L_x)$$
$$|k-m=0,|l-n|=d;f(k,l)=i,f(m,n)=j\}$$
$$P(i,j,d,45°)=\#\{(k,l),(m,n)\in(L_y\times L_x)\times(L_y\times L_x)$$
$$|(k-m=d,l-n=-d)或(k-m=-d,l-n=d);$$
$$f(k,l)=i,f(m,n)=j\}$$

式中，$(i,j)\in G\times G$；角度以 OX 轴为起始，逆时针方向计算；记号 $\#\{x\}$ 表示集合 x 的元素个数。

(2)区分波浪方向的纹理测度模型：

$$f_1=\sum_{i=1}^{N_g}\sum_{j=1}^{N_g}[P(i,j)]^2$$

$$f_3=\left[\sum_{i=1}^{N_g}\sum_{j=1}^{N_g}i\cdot j\cdot P(i,j)-\mu_x\mu_y\right]\bigg/\sigma_x\sigma_y$$

$$f_5=\sum_{i=1}^{N_g}\sum_{j=1}^{N_g}\frac{1}{1+(i-j)^2}P(i,j)$$

$$f_{11}=-\sum_{i=0}^{N_g-1}P_{x-y}(i)\lg\left[P_{x-y}(i)\right]$$

式中，$P_x(i)=\sum_{j=1}^{N_g}P(i,j)\quad(i=1,2,\cdots,N_g)$；

$$P_y(j)=\sum_{i=1}^{N_g}P(i,j)\quad(j=1,2,\cdots,N_g)；$$

$$P_{x-y}(k)=\sum_{\substack{i=1\\|i-j|=k}}^{N_g}\sum_{j=1}^{N_g}P(i,j)\quad(k=0,1,2,\cdots,N_g-1)；$$ μ_x、μ_y、σ_x 和 σ_y 分别表示 $P_x(i)$、$P_y(j)$ 的均值与均方差。

利用 Landsat TM 图像及地面收集数据对农作物面积进行估计的两种方法

Alonso F G, Soria S L, Gozalo J M C：利用 Landsat TM 图像及地面收集数据对西班牙的农作物面积进行估计的两种方法的比较. Remote Sensing of Environment, 1991, 35

(1) 直接扩展估计模型：

为了利用直接扩展法估计各种不同农作物面积，这里采用了分层随机采样公式：

$$\hat{T}=\sum_{i=1}^{h}\hat{T}(i)$$

式中，$\hat{T}(i)=D(i)\bar{y}(i)$；$\bar{y}(i)=[1/n(i)]\sum_{j=1}^{n(i)}y(i,j)$；

$$\hat{V}(\hat{T})=\sum_{i=1}^{h}\hat{V}(\hat{T}(i))=\sum_{i=1}^{h}D^2(i)\hat{V}(\bar{y}(i));$$

$$\hat{V}(\bar{y}(i))=[1-n(i)/N(i)][1/n(i)]\times[1/(n(i)-1)]\times\sum_{j=1}^{n(i)}[y(i,j)-\bar{y}(i)]^2$$；h 是土地利用层的数目；$\hat{T}$ 是对研究区域小麦面积的估计总值；$\hat{T}(i)$ 是第 i 层小麦面积的估计总值；$N(i)$ 是第 i 层的基本面积，$n(i)$ 是在第 i 层中采样的片段数；$D(i)$ 是第 i 层的表面；$\bar{y}(i)$ 是第 i 层中每个片段中小麦面积比例的平均值；$y(i,j)$ 是第 i 层中第个样本中小麦的比例；$\hat{V}(\hat{T})$ 是总体的估计方差；$\hat{V}(\hat{T}(i))$ 是第 i 层的估计方差，$\hat{V}[(\bar{y}(i))]$ 是 $\bar{y}(i)$ 的估计方差。

(2) 回归估计模型：

小麦总面积 T 的估计值为：

$$\hat{T}_{reg}=\sum_{i=1}^{h}D(i)\bar{y}_{reg}(i)$$

式中，$\bar{y}_{reg}(i)=\bar{y}(i)+\hat{b}(i)[m_x(i)-\bar{x}(i)]$，

$$\hat{b}(i)=\frac{\sum_{j=1}^{n(i)}[y(i,j)-\bar{y}(i)][x(i,j)-\bar{x}(i)]}{\sum_{j=1}^{n(i)}[x(i,j)-\bar{x}(i)]^2}$$ 是第 i 层的估计回归系数，$m_x(i)$ 是第 i 层中被分类为小麦的像元的比例，$\bar{x}(i)$ 是第 i 层中每个片段被归类为小麦的平均比例，$x(i,j)$ 是第 i 层中第 j 个样本中像元被归类为小麦的比例。

几何-光学冠层模型

Franklin J, Davis F W, Lefebvre PI：利用冠层荫蔽模型通过热成像图分析半干旱草原的树木覆盖. Remote Sensing of Environment, 1991, 36

(1) 每一个位置的非重叠覆盖指数 m 根据下式计算：

$$m=nR^2=\frac{-\ln(1-C)}{\pi}$$

式中，n 是密度；R^2 是每个像素的均方冠层半径；C 是光子解释冠层覆盖。

(2) 几何参数 Γ 是单位半径产生的回转球状体图像的面积(树木的冠层加上荫蔽背景)，Γ 对坡度的校正公式如下：

$$\Gamma'=\frac{\pi+(\Gamma-\pi)\cos\alpha\cos\theta}{\cos(\theta-\beta_y)}$$

式中，$\beta_i = \tan^{-1}(\tan\alpha\cos\phi)$；$\alpha$ 是坡度角；ϕ 是坡度与太阳方位角间的差值。

(3) 每个位置的总的图像覆盖 C' 可根据重叠模型计算如下：

$$C' = 1 - e^{-ml'}$$

地质统计学方法

Bhatti AU, Mulla D J, Frazier B E：利用地质统计学及热成像图像估计复杂侵蚀山地的土壤性质及小麦产量．Remote Sensing of Environment, 1991, 37

(1) 利用半变量图来研究在一对测量值随着分离距离变化的空间依赖性，半变量[$\gamma(h)$]利用下式计算：

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)}\sum_{i=1}^{n(h)}[z(x_i) - z(x_{i+h})]^2$$

式中，$n(h)$ 是距离为 h 的样品数，z 表示相应的土壤或农作物特性的测量值。

(2) St. John, Washington 附近一个地方被选做采样区。在这个研究中，所有测量值用下面的球模型描述：

$$\gamma(h) = C_0 + C_1[1.5(h/a) - 0.5(h/a)^3] \qquad (0 < h < a);$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \qquad (h \geqslant a)$$

式中，h 是观测点间的距离，a 是表示范围的模型参数，C_1 和 C_0 是模型参数。

(3) 两个具有相关性的变量之间的联合空间相关性可利用交叉半变量图来描述。距离为 h 的交叉半变量 $\gamma_{12}(h)$ 从下面式子估计：

$$\gamma_{12}(h) = \frac{1}{2n(h)}\sum_{i=1}^{n(h)}\{[z_1(x_i) - z_1(x_{i+h})] \times [z_2(x_i) - z_2(x_{i+h})]\}$$

式中，z_1 表示特性 1，z_2 表示特性 2。

KAPPA 统计模型

Congalton R G：遥感数据分类的精度评估的回顾．Remote Sensing of Environment, 1991, 37

$$\hat{K} = \frac{N\sum_{i=1}^{r}x_{ii} - \sum_{i=1}^{r}(x_{i+}x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^{r}(x_{i+}x_{+i})}$$

式中，r 是矩阵的行数，x_{ii} 是在 i 行 i 列的观察值，x_{i+} 和 x_{+i} 分别是行 i 和列 i 的边际和，N 是观察值的总数。

端元比例方法

Evans D L, Smith M O：在热成像与偏振 SAR 图像中对植被与岩石信号的分离．Remote Sensing of Environment, 1991, 37

Adams 等(1989)提出了一个同时解出端元比例的方法，方程为：

$$G_c DN_{i,c} + O_c = \sum_{r=1}^{N}F_r R_{r,c} + E_c \quad 且 \quad \sum_{r=1}^{N}F_r = 1$$

式中，$R_{r,c}$ 是参考端元 r 在波段 c 的反射系数；$DN_{i,c}$ 是未校准的图像端元 i 在波段 c 的辐射；F_i 是端元的比例；N 是端元的数目；E_c 是波段 c 的误差；G_c 是增益，O_c 是偏移；解出 F_i, G_c 和 O_c，利用系数 G_c 和 O_c 对辐射的测量值进行校准，得到反射系数的值。

季节性积雪估算公式

陈乾，陈添宇：祁连山季节性积雪资源的气候分析．地理研究，1991，10(1)

(1) 积雪反射率计算公式：

$$ch.1(N-10) = 1.3627 + 0.9303(1.075 + 0.004M)ch.1(N-9)$$

$$ch.2(N-10) = 3.6519 + 0.7673ch.2(N-9)$$

式中，$ch.1(N-10)$，$ch.1(N-9)$，$ch.2(N-10)$ 和 $ch.2(N-9)$ 分别为 NOAA-10 和 9 通道 1 和 2 的反射率，M 为自 1986 年 10 月起计算的月数。

(2) 雪深和雪水当量估算公式：

$$S_{WE} = \sum_{i=1}^{n}Sz\rho_n \times 10^4 \times 4.9457\cos\phi$$

$$\rho_n = 0.12(n+1)^{0.16}$$

式中，S_{WE} 为雪水当量；ρ_n 为降雪后第 n 天的雪密度；N 为流域内雪盖格点数；ϕ 为地理纬度。

水库蓄水量模型

刘建波，戴昌达：TM 图像在大型水库库情监测管理中的应用．环境遥感，1991，11(1)

$$V_d = \frac{1}{2}m(d^2 - c^2) + b(d - c) + V_c$$

式中，V_d 为水位为 d 时的水库蓄水量；V_c 为水位为 c 时的水库蓄水量；m 和 b 为参数。

卫星遥感水下地形地貌的模糊判别模型

李扶芳，易建春，厉银喜等：浅海水下地形地貌遥感信息提取与应用．环境遥感，1991，6(1)

(1) 卫星传感器所接收到的海水信号模型：

$$L = L_{SG} + L_{HG} + L_p + L_w$$

式中，L_{HG} 为天空光辐射及水面对天空漫射的反射；$L_w = \frac{E_0}{\pi} \cdot \frac{\tau}{n^2} \cdot \rho \cdot \exp[-\alpha(\sec\theta - \sec\phi)z]$，为离开水表面的向上辐射，即水介质的散射辐射，$E_0$ 为水表面的太阳辐照度、n 为海水折射率、τ 为大气传输率，ρ 为海底底质反射率，α 为海水衰减系数，θ 为传感器垂直方向的视角；ϕ 为太阳角，z 为遥感水深值；L_p 为大气柱上的大气分子及悬浮微粒的散射辐射；$L_{SG} = E \cdot \cos\phi \cdot \exp[-\tau/\cos\phi] \cdot r(\theta,\phi)$ 为水面的反射辐射，E 为大气顶部的太阳辐照度，$r(\theta,\phi)$ 为海面反射函数

(2) 水下地形地貌信息的提取与模糊判别：

水深分辨率 dz 模型：

$$dz \approx \frac{1.4}{\alpha(\sec\phi + \sec\theta)} \cdot \frac{dL}{L}$$

遥感水深 z 模型：

$$z = \frac{\ln\left(\frac{E_0}{\pi} \cdot \frac{\rho \cdot \tau}{n^2}\right) - \ln(L_w)}{\alpha(\sec\phi + \sec\theta)}$$

土壤水分的遥感监测模型

田国良：土壤水分的遥感监测方法 环境遥感，1991，6(2)

(1) 热惯量 $P(J \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \cdot s^{1/2})$ 模型：

$$P = (\lambda \rho C)^{1/2}$$

式中，λ 为热传导率($J \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} \cdot s^{-1}$)；$\rho$ 为密度($kg \cdot m^{-3}$)；C 为比热($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)。

(2) 作物缺水指数模型：

$$C_{WSI} = \frac{r[1 + r_c/(r_{ac} + r_{bh})] - r^*}{\Delta + r[1 + r_c/(r_{ac} + r_{bh})]}$$

式中，r 为干湿球常数($Pa \cdot °C^{-1}$)；r_{ac} 为修正的空气动力阻力($s \cdot m^{-1}$)；r_{bh} 为剩余阻力($s \cdot m^{-1}$)；r_c 为作物冠层阻力($s \cdot m^{-1}$)；$r^* = r[1 + r_{cp}/(r_{ac} + r_{bh})]$

农田全日蒸散总量的遥感瞬时估算模型

谢贤群：遥感瞬时作物表面温度估算农田全日蒸散总量 环境遥感，1991，6(4)

1. 计算瞬时蒸散速率的能量平衡——空气动力学阻抗遥感蒸散模式

(1) 能量平衡模式：

$$\lambda E = R_n - G - \rho c_p (T_c - T_a)/r_a$$

式中，λE、R_n 和 G 分别为蒸散耗热量、净辐射和土壤热流量；T_c 和 T_a 分别为作物表面温度和空气温度；r_a 为中性温度层结下的空气动力学阻抗

(2) 空气动力学阻抗模型：

$$r_{ac} = r_a + \frac{\phi_H}{uk} = r_a\left(1 + \frac{\phi_H}{\ln\frac{z-d}{z_0}}\right)$$

式中，$\phi_H = \begin{cases} (1-16R_i)^{-\frac{1}{2}} & R_i < -0.03 \quad (\text{不稳定}) \\ 1-5R_i & R_i > 0 \quad (\text{稳定}) \\ & -0.03 < R_i < 0 \quad (\text{弱不稳定}) \end{cases}$，为热量的层结稳定度函数，$R_i$ 为理查逊数，$R_i = -\frac{g}{T_0}(\partial T/\partial z) \bigg/ \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2$，$g$ 为重力加速度，T_0 为以绝对温度表示的空气平均温度，$T_0 = T_a + 273K$；z_0 为下垫面粗糙度；d 为零平面位移；卡尔曼常数 $k = 0.41$

2. 用一次瞬时观测资料计算日总蒸散量的模式

(1) 任意时刻到达地面上的太阳辐射通量密度 S_t 模型：

$$S_t = S_m \sin(\pi t/N)$$

式中，S_m 为中午时刻的最大辐射通量密度；t 为从日出到 S_t 出现时的时间间隔；N 为日出到日落的时间长度；在中午 $S_t = S_m$，$t = \frac{N}{2}$。

(2) 晴天全天的辐射通量日总量 S_d 模型：

$$S_d = \int_0^N S_m \sin(\pi t/N) N dt = \frac{2N}{\pi} S_m$$

TM 图像信息特征提取方法

陆灯盛，游先祥，覃赛华：TM 图像的信息量分析及特征信息提取的研究 环境遥感，1991，6(4)

(1) 单波段影像的信息量 H 模型：

$$H = -\sum_{i=1}^{55} P_i \lg_2(P_i)$$

式中，P_i 为第 i 灰阶出现的频率

(2) 微波图像的组合分析——最佳指数(OIF)模型：

$$OIF = \sum_{i=1}^{3} S_i \Big/ \sum_{j=1}^{3} |R_{ij}|$$

式中，S_i 为第 i 波段的标准差；R_{ij} 为波段相关系数。

植被冠层 PAR 吸收率和归一化植被指数的 SAIL 模型

Goward S N, Huemmrich K F：利用 SAIL 模型估计植被冠层 PAR 吸收率和归一化植被指数．Remote Sensing of Environment, 1992, 39

(1) 吸收的光合作用有效辐射($APAR$)：

$$APAR = PAR_0 - PAR_r - (PAR_t - PAR_s)$$

式中，PAR_0 是在冠层顶部入射的辐射；PAR_t 是在冠层底部的下行辐射(透射辐射)；PAR_r 是在冠层顶部上行辐射(植被及土壤反射的辐射)；PAR_s 是土壤反射的辐射。

(2) 光合作用有效辐射吸收比例（f_{APAR}）可估计：

$$f_{APAR} = 1 - \frac{PAR_r + (PAR_t - PAR_s)}{PAR_0}$$

(3) f_{APAR} 的日积分：

$$DIf_{APAR} = \int_{t}^{t_n} \frac{APAR}{PAR_0} dt$$

(4) 从 SAIL 模型导出的 APAR：

$$APAR_{(SAIL)} = S^{\downarrow}{}_{par(a)} + D^{\downarrow}{}_{par(a)} - D^{\uparrow}_{par(a)} - [D^{\downarrow}_{par(b)} + S^{\downarrow}_{par(b)} - \hat{D}_{par(b)}]$$

式中，$S^{\downarrow}$ 是下行镜向通量；$D^{\downarrow}$ 是下行漫射通量；$D^{\uparrow}$ 是上行漫射通量；(a)和(b)分别指冠层上方及下方。

(5) 光合作用有效辐射吸收比例为：

$$f_{APAR(SAIL)} = 1 - \frac{\hat{D}_{par(a)} + [D^{\downarrow}_{par(b)} + S^{\downarrow}_{par(b)} - D^{\uparrow}_{par(b)}]}{S^{\downarrow}{}_{par(a)} + D^{\downarrow}{}_{par(a)}}$$

不完全冠层表面温度的物理模型

Caselles V, Sobrino J A, Coll C：对不完全冠层的遥感观测获得的表面温度进行解释的物理模型．Remote Sensing of Environment, 1992, 39

一般而言，一个冠层由五个部分构成：顶部、冠壁的荫蔽部、地面的荫蔽部、地面的光照部及冠壁的光照部，因此，到达传感器的辐射(L)是来自顶部的辐射 L_t、地面的荫蔽部的 L_{g1}、地面的光照部的 L_{g2}、冠壁的荫蔽部的 L_{w1} 和冠壁的光照部的 L_{w2} 的加权求和：

$$L = P_t L_t + P_{g1} L_{g1} + P_{g2} L_{g2} + P_{w1} L_{w1} + P_{w2} L_{w2}$$

式中 P_t，P_{g1}，P_{g2}，P_{w1} 和 P_{w2} 分别是传感器所观测到的顶部、冠壁的荫蔽部、地面的荫蔽部、地面的光照部、冠壁的光照部所占比例，且有 $P_t + P_{g1} + P_{g2} + P_{w1} + P_{w2} = 1$。

(1) 来自顶部的辐射为：

$$L_t = \varepsilon_t L^0(T_t)$$

式中，ε_t 是顶部的发射率；$L^0(T)$ 是普朗克辐射函数；T_t 是顶部温度。

(2) 分别来自地面的荫蔽部和光照部的辐射为：

$$L_{g1} = \varepsilon_g L^0(T_{g1}) + (1-\varepsilon_g)\varepsilon_w [F_1 L^0(T_{w1}) + F_2 L^0(T_{w2})]$$

$$L_{g2} = \varepsilon_g L^0(T_{g2}) + (1-\varepsilon_g)\varepsilon_w [F_3 L^0(T_{w1}) + F_4 L^0(T_{w2})]$$

式中，ε_g 和 ε_w 是地面和冠壁的发射率；T_{g1} 和 T_{g2} 分别是地面荫蔽部和光照部的温度；T_{w1} 和 T_{w2} 分别是冠壁的荫蔽部和光照部的温度；F_1、F_2、F_3 和 F_4 分别是估计从冠壁的荫蔽部和光照部的辐射分别到达地面的荫蔽部和光照部的比例的形状因子。

(3) 分别来自冠壁的荫蔽部和光照部的辐射为：

$$L_{w1} = \varepsilon_w L^0(T_{w1}) + (1-\varepsilon_w)\{\varepsilon_g [G_1 L^0(T_{g1}) + G_2 L^0(T_{g2})] + \varepsilon_w F' L^0(T_{w2})\}$$

$$L_{w2} = \varepsilon_w L^0(T_{w2}) + (1-\varepsilon_w)\{\varepsilon_g [G_3 L^0(T_{g1}) + G_4 L^0(T_{g2})] + \varepsilon_w F' L^0(T_{w1})\}$$

式中，G_1，G_2，G_3 和 G_4 分别是估计从地面荫蔽部和光照部的辐射到达冠壁的荫蔽部和光照部的比例的形状因子；F' 是表示一个冠壁的辐射到达相邻冠壁的比例的项。

(4) 如果不同部分的温度的差异不是很大(<30℃)，则可引入系统的有效温度 T，将普朗克辐射在 T 处进行一阶泰勒展开：

$$L^0(T_i) = L^0(T)[1 + \beta(T_i - T)/T]$$

$$i = t, g1, g2, w1, w2 \quad 及\ \beta \approx 5$$

有效温度为：

$$T = aT_t + bT_{g1} + cT_{g2} + dT_{w1} + eT_{w2}$$

式中，$a=(\varepsilon_t/\varepsilon)P_t$；

$b=(\varepsilon_g/\varepsilon)[P_{g1}+(1-\varepsilon_w)(G_1P_{w1}+G_3P_{w2})]$；

$c=(\varepsilon_g/\varepsilon)[P_{g2}+(1-\varepsilon_w)(G_2P_{w1}+G_4P_{w2})]$；

$d=(\varepsilon_w/\varepsilon)\left[P_{w1}+(1-\varepsilon_g)(F_1P_{g1}+F_3P_{g2})+(1-\varepsilon_w)F'P_{w2}\right]$；

$e=(\varepsilon_w/\varepsilon)\left[P_{w2}+(1-\varepsilon_g)(F_2P_{g1}+F_4P_{g2})+(1-\varepsilon_w)F'P_{w1}\right]$；

ε是有效发射率。

利用误差矩阵改进的最大似然分类方法

Conese C, Maselli F：利用误差矩阵改进最大似然分类方法对面积的估计. Remote Sensing of Environment, 1992, 40

(1) 最大似然理论允许对每一个未知像素赋予一个其属于某个类的概率P，方法如下：

$$P=(2\pi)^{1/2n}|C|^{-1/2}e^{-(1/2)[(X-M)'C^{-1}(X-M)]}$$

式中，n是测量变量的数目；C是相应类别的方差-协方差矩阵；$\boldsymbol{M}$是相应类别的平均矢量；$\boldsymbol{X}$是像素对应矢量。

(2) 概率转换矩阵T：

$$T=R^{-1}E_c$$

式中，R是对角线矩阵；E_c是修正的误差矩阵，此转换矩阵用于修正最大似然法赋值的概率，即$V_{pc}=V_pT$，V_p是最大似然概率值的原矢量，V_{pc}是修正后的概率矢量。

AVHRR的分离窗方法

Ottlé C, Madjar D V：从NOAA9数据估计地表温度. Remote Sensing of Environment, 1992, 40

(1) 地表温度T_s可表示为：

$$T_s=a_0+\sum_{i=1}^{n}a_iT_i$$

式中，T_i是在n个不同的波段λ_i测量的亮度温度；系数a_i依赖于在波长k_i的吸收系数λ_i。

(2) 对两个大气窗的情况：

$$a_1=\frac{k_2}{k_2-k_1}$$

$$a_2=\frac{-k_1}{k_2-k_1}$$

(3) 对AVHRR 波段4和波段5窗口：

$$T_s=a_0+a_1T_4+a_2T_5$$

如果在分离窗方法中考虑到的贡献，利用了主成分分析方法来计算多线性回归系数，下面给出了三个不同的方程：

$$T_s=a_4T_4^V+a_5T_5^V+a_6T_6^H+a_7T_7^H+a_8T_8^H+a_{10}T_{10}^H+a_{11}T_{11}^H$$

$$T_s=a_4T_4^V+a_5T_5^V+a_6T_6^H+a_7T_7^H+a_{10}T_{10}^H-a_{11}T_{11}^H$$

$$T_s=a_4T_4^V+a_5T_5^V+a_7T_7^H+a_{10}T_{10}^H$$

式中，T_i^V和T_i^H分别是AVHRR和HIRS在波段i测量到的亮度温度。

地表温度的SWT算法

Kerr Y H, Lagouarde J P, Imbernon J：利用改进分离窗口算法从AVHRR数据中获取精确的地面温度. Remote Sensing of Environment, 1992, 41

(1) 对AVHRR/2，其方程为

$$T_s=a_0+a_1T_{10.8}+a_2T_{11.9}$$

式中，$a_1+a_2=1$；$T_{10.8}$和$T_{11.9}$分别是两个红外波段在大气顶部的亮度温度。

(2) 对部分覆盖植被：

$$T_s=CT_v+(1-C)T_{bs}$$

式中：

$$T_{bs}=a_{bs0}+a_{bs1}T_{10.8}+a_{bs2}T_{11.9}$$

$$T_v=a_{v0}+a_{v1}T_{10.8}+a_{v2}T_{11.9}$$

$$C=\frac{NDVI-NDVI_{bs}}{NDVI_{bv}-NDVI_{bs}}$$

式中，T_{bs}和T_v分别是裸地及植被覆盖的表面温度；a_{bsi}和a_{vi}分别是裸地及植被的参数；$NDVI_{bs}$是裸地$NDVI$的最小值；$NDVI_V$是完全植被覆盖的$NDVI$的可能最高的值。

均匀区域上植被覆盖的叶面积指数

Price J C：从可见光及近红外反射率估计植物量. Remote Sensing of Environment, 1992, 41

$$I_{1a}=\frac{1}{2c_2}\ln\left\{r_{\infty 2}-R_2-\left[(r_{\infty 2}-R_2)^2-4(r_{\infty 2}-ar_{\infty 1}-b)(R_1-r_{\infty 1})^{1/2}[2(R_1-r_{\infty 1})]^{-1}\right]\right\}$$

式中，r_{∞} 是当 $I_{1a}=\infty$ 时的反射率；下标 1 和 2 分别代表可见光和近红外辐射；R_1 和 R_2 是土壤和冠层在可见光和红外波段的反射率；a，b 和 c_2 是参数。

(1) 叶植被指数 V_L 定义为：

$$V_L=1-e^{-2c_2 I_{1a}}$$

(2) 对混合像素情况，可简单假设反射率的测量值相当于两个表面的反射率的和，即致密植被覆盖表面，其比例为 f，以及裸地表面，其比例为 $1-f$：

$$f=\frac{R_2-aR_1-b}{r_{\infty 2}-ar_{\infty 1}-b}$$

(3) 当植被密度非常低时：

$$V_L=2c_2 I_{1a}$$

$$f=2c_2 I_{1a}\frac{1-ac_1 r_{\infty 1}/(c_2 r_{\infty 2})}{1-(ar_{\infty 1}+b)}$$

辐射率 R 模型

陆家驹，李士鸿：TM 资料水体识别技术的改进. 环境遥感，1992，7(1)

$$R=\frac{D}{D_{max}}(L_{max}-L_{min})+L_{min}$$

式中，D 为图像上像元的亮度值；D_{max} 为最大的像元亮度值，即 255；L_{max} 和 L_{min} 分别为传感器测量的最大和最小辐射值。

用气象卫星资料监测积雪的计算方法

刘玉洁，袁秀卿，张红：用气象卫星资料监测积雪。环境遥感，1992，7(1)

(1) 观测数据的定标与订正：

定标公式：$E_i=G_i X_i+I_i \quad (i=1,2,\cdots,5)$

订正公式：$E=E(Z_s)/\cos(Z_s)$

式中，E_i 为各光谱通道观测的物理量；G_i, I_i 为各通道的定标系数即斜率与截距；X_i 为 A_{VHRR} 个通道观测的计数值；E 为订正后的反射率；$E(Z_s)$ 为定标后的反射率；Z_s 为观测点的太阳天顶角。

(2) 几何校正公式：

$$I=I'-S_c\cdot D\cdot\tan\varphi\sin\lambda$$

$$J=J'\pm S_c\cdot D\cdot\tan\varphi\cos\lambda$$

(北半球为+，南半球为－)

$$\varphi=\frac{1}{2}(90^\circ-|\varphi_n|);\quad \lambda=\lambda_0-\lambda_n$$

式中，I' 和 J' 分别为北半球投影图中心点坐标；S_c 为投影图中单位长度可存放的像素点数；I'，J' 和 S_c 可根据投影图的分辨率任取；D 为投影图中从极点到赤道的距离；λ_0 为投影图的主经度；λ_n 和 φ_n 分别为卫星观测点 N 的地理经纬度。

(3) 积雪阈值：

$$R_{th}=R_0+\Delta R$$

$$T_{th}=T_0+\Delta T$$

式中，R_{th} 和 T_{th} 分别为积雪反射率和亮度温度阈值；R_0 和 T_0 为通用阈值；ΔR 和 ΔT 为修正阈值。

悬浮泥沙遥感定量的统一模式

黎夏：悬浮泥沙遥感定量的统一模式及其在珠江口中的应用. 环境遥感，1992，7(2)

$$L=A+B[S/(G+S)]+C[S/(G+S)]e^{-DS}$$

式中，A，B 和 C 为相关式的待定系数，G，D 为待定的参数；L 为遥感传感器接收到的辐射亮度；S 为悬浮泥沙含量。

航片抽样精度的估算——抽样误差 E 模型

乔玉良：水土流失区土地利用动态的遥感监测. 环境遥感，1992，7(3)

$$E=\sqrt{\frac{1.96\frac{1-f}{m-1}\left(\frac{\sum P_{ie}^2}{m}-P_i^2\right)}{P_i}}$$

式中，$f=\frac{A_{抽}}{A_{总}}$ 为面积抽样比，$A_{抽}$ 和 $A_{总}$ 分别为每种地类抽区面积和总面积；m 为航片群数；P_i 为每张航片(群)每第类点代表的面积；P_{ie} 为每地类 S 点代表的面积均值。

K-T 变换公式与森林蓄积量估算模型

张友静，方有清：K-T 变换的林学意义及其在森林蓄积量估算中的应用. 环境遥感，1992，7(3)

1. K-T 变换及其林学意义

(1) K-T 变换公式：

$$Y=R^T X+A$$

式中，X 为数据向量；A 为增益向量；R 为变换矩阵；Y 为变换后的数据向量。

(2) 林学意义：

$$V_{OL} = 186.5 - 1.36B$$

$$B = \sum_{i=1}^{n} R_{1,i} X_i$$

式中，V_{OL} 为蓄积量；B 为亮度。

2. 森林蓄积量遥感估算

估算模型：

$$V_{OL} = b_0 + b_1 \cdot (W^2 \cdot e^{\theta}) \cdot (\lg G \cdot e^{c})$$

式中，W 为湿度指标；G 为绿度指标；θ 为热量指标；C 为林分郁闭度。

遥感积雪识别中的分级模糊聚类算法

赵帅锋，罗杰波，刘政凯：分级模糊聚类算法及其在遥感积雪识别中的应用．环境遥感，1992，7(3)

(1) CFCM 聚类方法的泛函 J_m 模型：

$$J_m(U,V,A) = \sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c} u_{ik}^{m} \|x_k - V_i\|_{A_i}^2$$

式中，$1 \leq i \leq c, m \in (1,\infty)$ 为权指数；u_{ik} 是第 i 个数据对第 k 类的隶属函数；$\|x_k - V_i\|_A^2$ 为马氏距离，$\|x_k - V_i\|_{A_i}^2 = (x_k - V_i)^{T} A_i (x_k - V_i)$，$A_i$ 为正定矩阵，对应于每一类。

(2) SFCM 算法——归一化隶属函数模型：

$$u_{ik}^{(b)} = u'_{ik} \Big/ \sum_{j=1}^{c} u'_{jk}$$

(3) 调整后的隶属度模型：

$$v_i(j,k) = w \cdot u_i(j,k) + (1-w)[u_i(j,k+1) + u_i(j,k-1) + u_i(j-1,k) + u_i(j+1,k+1)]/4$$

式中，w 为权重，可适当调整。

(*X, Y, Z*)颜色系统与(*R, G, B*)颜色系统的转换模型

张昭贵：彩色合成选择法及其在黄河入海口研究中的应用．环境遥感，1992，7(4)

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.607 & 0.174 & 0.201 \\ 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.000 & 0.066 & 1.117 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

SCS 模型的改进

魏文秋，谢淑琴：遥感资料在 SCS 模型产流计算中的应用．环境遥感，1992，7(4)

(1) 初损 I_a 与前期土壤蒸发 E_a 的关系模型：

线性关系：$I_a = a + bE_a$

指数关系：$I_a = ae^{bE_a}$

幂函数关系：$I_a = aE_a^b$

(2) 流域当时的可能滞留量 S 与土壤含水量 P_a 的关系模型：

线性关系：$S = c - dP_a$

指数关系：$S = ce^{-dP_a}$

幂函数关系：$S = cP_a^{-d}$

式中，a，b，c 和 d 均为待定系数。

土壤侵蚀定量模型

刘黎明：黄土高原丘陵沟壑区土壤侵蚀遥感定量与信息系统研究——以陕西米脂县为例．自然资源学报，1992，7(4)

(1) 径流公式：

$$Q - R \cdot \exp(-R_c/R_0)$$

式中：$R_c = 1000MS \times BD \times RD(E_t/E_0)^{0.5}$；$R_0 = R/R_n$；$Q$ 为流域年平均径流模数(mm)；R 为年降雨量(mm)；R_n 为年降雨天数(d)；MS 为 1/3 巴田间持水量(%)；BD 为表土容重($t \cdot m^{-3}$)；E_t/E_0 为年实际蒸散量与潜在蒸散量之比。

(2) 小流域土壤流失量地学模型：

$$Y = Q \times [0.306P^{-0.859}X^{-0.294}(0.062)^{d}(1.502)^{s}(0.985)^{l}(0.921)^{f}]$$

式中：Y 为小流域平均土壤侵蚀模数($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)；$Q$ 为小流域平均径流模数($m^3 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)；$P$ 为植被度及治理度(%)；X 为流域形状参数；d 为坡耕地百分数(%)；s 为平均坡度(%)；l 为平均坡长(m)；f 为 0.1~2.0mm 的细沙含量(%)。

(3) USLE 修正方程：

$$A = 1.584 + 0.974\text{RKLSCP} \qquad (r = 0.88)$$

叶绿素含量及 Tahoe 湖深度的估计模型

Hamilton M K, Davis C, Rhea W J et al：利用 AVIRIS 估计叶绿素含量及 Tahoe 湖的深度．Remote Sensing of Environment, 1993, 44

(1) 反射系数的遥感值从下式得：

$$\frac{L_w}{E_d} = \frac{S_{w+s} - S_s\rho(\theta)}{\pi S_g / R}$$

式中，L_w 是水截留的辐射、E_d 是水表面的辐射和因子 S 分别表示水加上反射的天空光、天空光及灰度标准的信号；$\rho(0)$ 是海水对垂直的偏振光在角度 θ 的 Fresnel 反射系数；R 是灰度标准的反射率；因子 π 将一个朗伯漫体的反射的辐射转换为发射的辐射。

(2) 叶绿素浓度估计为：

$$\lg(\text{chla}) = 0.053 + 1.71\lg\left[L_w(550)/L_w(443)\right]$$

式中，$L_w(550)$ 和 $L_w(443)$ 是从表面发出的、分别以 550nm 和 443nm 为中心的波段上的上行辐射。

(3) 水深(Z)可通过一个经验模型估计：

$$Z = a_0 + a_1 R_{\text{RS}\lambda 1} + a_2 R_{\text{RS}\lambda 2}$$

式中，R_{RS} 是反射系数的遥感值。

红外遥感油气资源勘探的技术方法

朱振海：红外遥感油气资源勘探技术及其有效性评估，环境遥感，1993，8(2)

(1) 航空短波红外扫描数据的原始格式：

$$P = \begin{cases} \left[P_{ij}^1 P_{ij}^2 \cdots P_{ij}^8\right], \\ j = N, \ i = 1,2,\cdots,M \end{cases}$$

(2) 正切纠正模型：

像元宽度： $L = H\tan\theta$

机下点像元： $L_1 = L = H\tan\phi$

最大扫描角像元： $L_N = H\tan\left[\theta - (l_N - 1)\phi\right]$

式中，H 为数据采集的航高；θ 为扫描视场角；ϕ 为瞬时视场角；l_N 为扫描线长(N=128)。

(3) 辐射纠正模型：

$$M = \frac{\rho t\left[N_0\cos\theta_0 e^{-\tau'(\sec\theta_0+\sec\theta)} + N_s e^{-\tau'\sec\theta}\right] + N_a}{\pi}$$

式中，ρt 为目标体的反射率；N_0 为太阳的总辐射；$\cos\theta_0$ 为目标体相对的太阳入射光束方向的取向；τ' 为大气光学厚度；$\sec\theta_0$ 为太阳辐射光程；$\sec\theta$ 为探测器接收目标体反射的光程；N_a 为天空光散射光程辐射度；N_s 为大气散射太阳辐射分量。

叶面积指数与 CASI 数据的相关关系

浦瑞良，宫鹏，约翰 R. 米勒：美国西部黄松叶面积指数与高光谱分辨率 CASI 数据的相关分析 环境遥感，1993，8(2)

(1) 线性拟合模型：

$$\rho_s = a_s + b_s\lambda$$

$$\rho_v = a_v + b_v\lambda + c_v\lambda^2 + d_v\lambda^3$$

式中，ρ_s 和 ρ_v 分别为裸土和植被的波长 λ 函数的拟合反射率；a_s、b_s、a_v、b_v、c_v 和 d_v 均为系数。

(2) 逐步回归分析——估计精度模型：

R^2 = 取由回归分析确定的复相关系数的平方

$$SE = \sqrt{\sum_i^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n-k-1)}$$

式中，y_i 和 $\hat{y}_i$ 分别为实测和预测 LAI 值；n 为 LAI 样本数；k 为预测的变量数；SE 为估计 LAI 的标准误差。

土壤背景二轴纠正的植被指数 T_{WVI} 模型

黎夏：二轴土壤背景纠正的植被指数及其在华南水稻遥感估产中的应用，环境遥感，1993，8(3)

$$T_{\text{WVI}} = \frac{(R_{\text{NIR}} - dR_{\text{NIR}}) - (R_{\text{red}} - dR_{\text{red}})}{(R_{\text{NIR}} - dR_{\text{NIR}}) + (R_{\text{red}} - dR_{\text{red}}) + L}(1+L) = \frac{R_{\text{NIR}} - R_{\text{red}} - \Delta}{R_{\text{NIR}} + R_{\text{red}} + L}(1+L)$$

式中，Δ 为土壤背景第二轴的偏距 D 造成遥感数据的偏移量，其计算公式可表达为

$$\Delta = dR_{\text{NIR}} - dR_{\text{red}} = \sqrt{2}e^{-K_{\text{LAI}}} \cdot D = \sqrt{2}\left(1 - \frac{I_\lambda - I}{I_\infty - I}\right) \cdot D;$$

R_{NIR} 为红外波段反射率；R_{red} 为红波段反射率。

航空遥感测量海面油膜厚度的基本公式

杨跃忠，卢桂新，钟其英等：航空遥感测量海面油膜厚度的研究 环境遥感，1993，8(3)

(1) 油膜处的反射率 R_{od} 模型：

$$\begin{aligned} R_{\text{od}} = [&(1 - R_{21}^2(\theta))(1 - R_{32}^2(\theta)e^{-2\beta}) - \\ &4R_{32}(\theta)R_{21}(\theta)e^{-\beta}\sin(\phi_{32}+\alpha)\sin\phi_{21}]/\{[1 + \\ &R_{32}^2(\theta)R_{21}^2(\theta)e^{-2\beta}] - 2R_{32}(\theta)R_{21}(\theta)e^{-\beta} \cdot \\ &\cos(\phi_{32}+\phi_{21}+\alpha)\} \end{aligned}$$

式中，θ 为入射角；R_{21} 和 R_{32} 分别为油-空气、海水-油界面的菲涅尔反射系数；ϕ_{21} 和 ϕ_{32} 分别为 R_{21} 与 R_{32} 的相位角；α 和 β 为介电常数和油膜厚度的函数。

(2) 水面和油膜的固有亮温差 ΔT_B 与油膜厚度 d 的关系模型：

$$\Delta T_B = T_o(R_{\text{od}} - R_W) = T_o R(d)$$

式中，T_o 为海水的物理温度；$R(d)$ 表示当其他参数固定时，油-水反射率差为膜厚 d 的函数。

(3) 表观亮温差 ΔT_A 与 ΔT_B 的关系模型：

$$\Delta T_B = \frac{\Delta T_A}{\eta_a(1 - T_{sky}T_0)}$$

式中，η_a 为天线主瓣效率；T_{sky} 为天空辐射亮温。

油气勘查模型

何在成，丁铨，蒋保林等：NOAA 气象卫星 AVHRR 数据在江汉油气勘查中的应用．环境遥感，1993，8(4)

(1) 欧氏距离系数模型：

$$d_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_{K=1}^{N}(x_{iK} - x_{jK})^2}{N}}$$

式中，$i, j = 1,2,3,\cdots,M$；N 内波段数；x_{iK} 和 x_{jK} 分别为第 i，j 个像元的亮度值。

(2) 视热惯量 ATI 模型：

$$ATI = \frac{BC(1 - A)}{\Delta T}$$

式中，B 为拉伸因子；C 为纬度和太阳高度角因子；A 为反照率；I 为总的入射光强；ΔT 为同一像幅中同一像元在两时间(2:10 pm)与(2:10 am)所记录的地物辐射红外两度之差值并转换成温度之差值。

(3) 热惯量 P 模型：

$$P = \alpha ATI + \beta$$

式中，α 为拉伸因子；β 为补偿值。

水稻减产量 P 模型

李光明：四湖地区洪水期遥感图像的解译．环境遥感，1993，8(4)

$$P = \sum_{i-1}^{N} S_i Y_i Q$$

式中，S_i 和 Y_i 分别为第 i 高程区间的面积和减产率；Q 为理想产量；N 为区间数。

大面积小麦遥感估产模型

王乃斌，周迎东，林耀明等：大面积小麦遥感估产模型的构建与调试方法的研究．环境遥感，1993，8(4)

$$\hat{Y} = a\sum Gb\frac{T_0}{T_i}(D_0 - D_i)\left[Q\Big/\left(\frac{\Delta G}{\Delta T}\right) + C\right] + W$$

式中，$\hat{Y}$ 为估算的单位面积产量(kg·亩$^{-1}$)；G 为返青至抽穗绿度累加以 $\sum G$ 表示；T_0 为拔节后期至灌浆始期小麦品种需要的积温或多年平均地温累加(℃)；T_i 为当年拔节后期至灌浆始期积温或当年地温累加(℃)；D_0 为小麦灌浆起始日期(d)；D_i 为拔节后期日期(d)；Q 为小麦品种标准千粒重(g)；ΔG 为灌浆始期至灌浆终止的绿度差；ΔT 为灌浆始期至灌浆终止日期差；a，b 和 c 为实验常数。

田块尺度的蒸散(ET)估计模型

Sandholt I, Andersen H S：利用 1987 年生长季节中 NOAA-AVHRR 数据获取 Senegalese Sahel 地区实际蒸散．Remote Sensing of Environment, 1994, 46

(1) 显热 Q_h 可用下式计算：

$$Q_h = -C_p \rho u_* T_*$$

式中，u_* 是摩擦速度；T_* 是无量纲的温度梯度；ρ 是空气密度；C_p 是定压热容量。

(2) ET 估计的统计模型：

Jackson 等(1977)提出了 ET 估计的半经验统计模型：

$$ET - R_N = -H - G \quad (\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$$

式中，ET 是蒸散；R_N 是净辐射量；H 是显热通量；G 是日地面热通量。

(3) 如果 G 被考虑为 0，上式可近似为：

$$ET - R_N = a + b(T_s - T_a)$$

式中，a 和 b 是回归参数；T_s 和 T_a 分别是地表和大气的日中温度。

(4) Q_h 显热通量可表示为：

$$Q_h = \rho C_p(T_s - T_a)/r_a$$

冠层后向散射的 Water-cloud 模型

Prévot L, Champion I, Guyot G：利用双重频谱散射仪(C 和 X 波段)估计表面土壤水分及小麦冠层的叶面积指数．Remote Sensing of Environment, 1994, 46

(1) 对给定入射角 θ：

整个冠层：$\sigma^0 = \sigma^0_{veg} + \sigma^0_{soil}$

植被部分：$\sigma^0_{veg} = AL^E \cos\theta(1 - t^2)$

$$t^2 = \exp(-2BL/\cos\theta)$$

式中，t^2 是通过冠层的双路径衰减；L 是叶面积指数，E 是植被参数；A 和 B 是依赖于冠层类型的参数。

(2) 土壤的贡献 σ^0_{soil}(dB)给出为：

$$\sigma^0_{soil} = C + Dh_v$$

式中，h_v是表面水分含量；参数 C 和 D 依赖于表面粗糙度。

多源遥感数据分类精度的评估模型

Fitzgerald R W, Lees B G：多源遥感数据分类精度的评估。Remote Sensing of Environment, 1994, 47

Kappa 统计基于一个具有 k 个类别的双向交叉分类表。

(1) 总的一致性 p_o 通过对误差矩阵的对角元 p_{ii} 求和得到：

$$p_o = \sum_{i=1}^{k} p_{ii}$$

(2) 总的期望一致性 P_e 通过对边界部分 $p_{i\cdot}$ 和 $p_{\cdot i}$ 求和得到：

$$p_e = \sum_{i=1}^{k} p_{i\cdot} p_{\cdot i}$$

(3) Kappa 统计的估计值 $\hat{K}$ 的计算公式：

$$\hat{K} = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e}$$

(4) Kappa 统计的标准误差的计算公式：

$$\text{s.e.}(\hat{K}) = \frac{1}{(1-p_e)\sqrt{n}}\left[p_o + p_e^2 - \sum_{i=1}^{k} p_{i\cdot} p_{\cdot i}(p_{i\cdot} + p_{\cdot i})\right]^{1/2}$$

(5) Kappa 检验统计可转换为标准正交分(standard normal sore)Z：

$$Z = \frac{\hat{K}}{\text{s.e.}(\hat{K})}$$

I_{ndv} 时间变化图的半经验公式

Fischer A：基于粗分辨率数据的植被指数的季节变化模型及农作物参数的反演 Remote Sensing of Environment, 1994, 48

$$I_{ndv}(t) = vb + \frac{k}{1+\exp[-c(t-p)]} - \frac{k + vb - ve}{1+\exp[-d(t-q)]}$$

式中，t 是在一年中的时间变量；原点选在 1 月 1 日，k 是与 I_{ndv} 的渐近值有关的参数；c 和 d 定出了曲线在第一个及第二个变形点处的斜率；p 和 q 是这两个点的日期；vb 和 ve 是参数。

蒸发率的遥测模型

Reicosky D C, Brown P W, Moran M S：小麦冠层温度、光合作用及蒸发蒸腾率的昼间变化趋势。Remote Sensing of Environment, 1994, 49

$$LE = R_n - G - H$$

式中，LE 是潜热通量密度；R_n 是净辐射通量密度，G 是土壤热量通量密度；H 是显热通量密度。

Kriging 插值模型

Rossi R E, Dungan J L, Beck L R：盲区的 Kriging 插值——遥感的地学统计插值方法。Remote Sensing of Environment, 1994, 49

(1) 如果 $z^*(x_0)$ 是在位置 x_0 需要估计的值，$z(x_i)$ 是在相应位置的样本值，λ_i 是给予每个样本值的权重，则一般估计可表示为：

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i z(x_i)$$

(2) Kriging 插值方法有两个要求，式中一个是估计必须是无偏的，即：

$$E[Z(x) - Z^*(x)] = 0$$

此要求应满足：

$$\sum_{i=1}^{N} \lambda_i = 1$$

一般 Kriging 插值过程即是解出权重值 λ_i，其条件为保证权重值之和为 1，使 $[Z(x) - Z^*(x)]$ 对所有估计的点最小化，同时使估计方差 σ_{ev}^2 最小化，即 $\sigma_{ev}^2 = V[Z^*(x) - Z(x)]$，$V$ 为变异函数。

蒸发系数与植被指数间关系的模拟模型

Choudhury B J, Ahmed N U, Idso S B et al：通过模型模拟研究蒸发系数与植被指数间的关系。Remote Sensing of Environment, 1994, 50

(1) 农作物系数(K_c)定义为总蒸发量(E)与参照农作物蒸发量(E_r)的比值：

$$K_c = E / E_r$$

(2) 参照农作物蒸发量可表示为：

$$E_r = \frac{a\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma}$$

式中，Δ 是饱和水蒸气压相对于温度变化的斜率；γ 是

湿度计常数；$R_n = 0.8S - 75$ 是净辐射，S 是观测的日照辐射；$G = 0.07R_n$ 是土壤热通量；a 是一个常数，对在非平流条件下非胁迫植物平均日蒸发量建议取值1.26左右；

(3) Huete 给出了19种土壤类型在湿润及干燥条件下 I_v 与蒸腾系数的关系：

$$T_c = -0.26 + 1.46d_n$$

$$T_c = -0.15 + 1.74I_{sav}$$

$$T_c = 0.03 + 1.54I_{tsav}$$

式中，d_n 是标准差植被指数；I_{sav} 是土壤校正植被指数；I_{tsav} 是转换土壤校正植被指数。

(4) T_c 与 I_v 间的一个直接的关系式可表示为：

$$T_c = 1 - \left(\frac{I_{v\max} - I_v}{I_{v\max} - I_{v\min}} \right)^{\eta}$$

式中，$\eta = (\kappa / \kappa')$。

小麦地土壤及作物参数的估计模型

Taconet O. Benallegue M. Madjar D Vidal et al：利用机载雷达在C和X谱段的后向散射数据估计小麦地的土壤及作物参数．Remote Sensing of Environment, 1994, 50

(1) 小麦冠层的在CHH谱段的雷达波截面积可表示为：

$$\sigma^0 = \exp(-2BM_v / \cos\theta)\sigma^0_{soil}$$

式中，M_v 是植物水分含量；θ 是入射角；B 代表植物的衰减。

为了考虑土壤表面粗糙度及土壤湿度对土壤雷达波截面积的影响，Prévot 等提出了下面的参数公式：

$$\sigma^0_{soil}(\text{in dB}) = C(F,\theta) + Dw_g$$

式中，w_g 是土壤湿度($\% \cdot cm^3 \cdot cm^{-3}$)；$D$ 是信号对土壤湿度的灵敏度；F 表示了雷达设置。

(2) 对XHH谱段，雷达波截面积可表达为植被层 σ^0_{veg} 和土壤层 σ^0_{soil} 的贡献之和：

$$\sigma' = \sigma^0_{veg} + \tau^2\sigma^0_{soil}$$

$$\sigma^0_{veg} = A\cos\theta(1-\tau^2)$$

$$\tau^2 = \exp(-2BM_v / \cos\theta)$$

式中，参数均表示植被的散射。

植被冠层中双向间隙函数及其测定测量模型

Andrieu B. Sohbi Y. Ivanov N：测量植被冠层中双向间隙函数的一个直接方法　Remote Sensing of Environment, 1994, 50

(1) 植被冠层的间隙函数 $P_0(z,\Omega)$ 是在高度 z 的某点与冠层顶部某点沿方向 Ω 光照畅通路径存在的概率。双向间隙函数 $P_0(z,\Omega_1,\Omega_2)$ 可表示为：

$$P_0(z,\Omega_1,\Omega_2) = P_0(z,\Omega_1)P_0(z,\Omega_2)C_{HS}(z,\Omega_1,\Omega_2,s_1)$$

式中，$P_0(z,\Omega_i)$ 一般通过在高度 z 以上的冠层内植物单元的方位角分布 $g(\Omega_L)$ 和植物单元面积指数 l 来计算；$C_{HS}(z,\Omega_1,\Omega_2,s_1)$ 是修正函数；s_1 是叶片大小系数。

(2) 在指定高度 z 叶片的特征直径 d_1 通过下式计算：

$$d_1 = \frac{l_{leaf}W + l_{stem}D}{(H-z)(l_{leaf} + l_{stem})}$$

式中，H 是整个冠层的高度；W 是叶片的平均宽度，D 是高于 z 的冠层中树干的平均直径；l_{leaf} 和 l_{stem} 分别是高于 z 的冠层的叶面积指数和树干面积指数。

分维值 D 模型

章杨清，刘政凯：利用分维向量改进神经网络在遥感模式识别中的分类精度．环境遥感，1994，9(1)

$$D = -\frac{\mathrm{d}\lg N(L)}{\mathrm{d}\lg r}$$

式中，$r = L/L_{max}$ 为比例因子。

距平植被指数模型

陈维英，肖乾广，盛永伟：距平植被指数在1992年特大干旱监测中的应用．环境遥感，1994，9(2)

(1) 遥感方程：

$$N_{sr}(z,\theta,\phi,\theta',\phi') = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda)[E(z,\lambda)\cdot R(z,\phi;\theta',\lambda)\cdot\tau(\theta',\lambda) + L_a(z,\theta,\phi;\theta',\phi')]\mathrm{d}\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\varphi(\lambda)\mathrm{d}\lambda}$$

式中，N_{sr} 是带宽为 r 时的归一化仪器输出；$\phi(\lambda)$ 为仪器的光谱响应；λ_1 和 λ_2 分别为光谱通道上、下限；$E(\lambda)$ 为某一象点的入射辐射；$\tau(\lambda)$ 为大气透过率；L_a 为大气程辐射；θ' 为卫星天顶角；z 为太阳天顶角；ϕ 为太阳方位角；ϕ' 为卫星方位角。

(2) 旬距平指数ATNDVI模型：

$$\text{ATNDVI} = (\text{TNDVI} - \overline{\text{TNDVI}})$$

式中，TNDVI 为当年该旬的植被指数值；$\overline{\text{TNDVI}}$ 为同旬各年的归一化植被指数的平均值。

(3) 月距平植被指数 AMTNDVI 模型：

$$\text{AMTNDVI} = (\text{MTNDVI} - \overline{\text{MTNDVI}})$$

式中，MTNDVI 为当年该月的植被指数值；$\overline{\text{MTNDVI}}$ 为同月各年的归一化植被指数的平均值。

提高土地覆盖精度的相关模型

塔西甫拉提·特依拜：利用分形特征量提高土地覆盖分类图精度的研究．环境遥感，1994，9(2)

(1) Fractal Brown 函数模型：

$$\lg E\left[\left|f(X+\Delta X)-f(X)\right|\right]-H\lg\left|\Delta X\right|=\lg C$$

式中，H、C 均为最小的常数，其表达式可写为

$$(H\lg C)=\begin{bmatrix}\sum\left(\lg\left|\Delta x\right|\right)^2 & \sum\lg\left|\Delta x\right| \\ \sum\left|\Delta x\right| & \sum 1\end{bmatrix}^{-1}\times\begin{bmatrix}\sum\lg\left|\Delta x\right|\cdot\lg E\left[\left|f(x+\Delta x)-f(x)\right|\right] \\ \sum\lg E\left[\left|f(x+\Delta x)-f(x)\right|\right]\end{bmatrix},$$

$\sum$ 为 $\left|\Delta X\right|=\left|\Delta X\right|_{\min}$ 到 $\left|\Delta X\right|_{\max}$ 的和。

(2) 区分精度模型：

$$P_i = M_i / N_i$$

(3) 误分类率模型：

$$F_i = \sum_j \left(M_{ij} + M_{ji}\right) / N_i$$

式中，I 为训练场地内的分类集群；M_i 为分类到集群 i 的像元数；M_{ij} 为训练场地中集群 i 内分类到集群 j 的像元数；M_{ji} 为训练场地中集群 j 内分类到集群 i 的像元数；N_i 为 i 类型训练场地的像元数。

(4) 集群间发散度模型：

$$D_{ij} = \lg d_{ij}$$

$$d_{ij} = (1/2)T_r\left[\left(S_i - S_j\right)\left(S_j^{-1} - S_i^{-1}\right)\right] - (1/2)T_r\left[\left(S_i^{-1} - S_j^{-1}\right)\left(M_i - M_j\right)\left(M_i - M_j\right)^T\right]$$

式中，S_i 为集群 I 的波段间方差协方差矩阵；M_i 为 I 类型的均值矩阵；T_r 为轨迹；$\boldsymbol{T}$ 为置换矩阵。

亮度值转换模型

徐希孺、牛铮、曹洪钦等：对建立遥感估产模式的几点初步认识．环境遥感，1994，9(2)

$$\frac{L(\theta_v,\varphi)}{L(0)} = 1 - \left[B_0 + B_1\sin\left(\frac{\phi}{2}\right) + B_2\left(\frac{1}{\cos\theta_0}\right)\right]\sin\theta_v$$

式中，$L(\theta_v,\varphi)$ 为传感器斜视条件下测得的亮度值；θ_v 为视线天顶角；ϕ 为视线与太阳直射光线之间的相对方位角；θ_0 为太阳天顶角；$L(0)$ 为转换到垂直视状态下的亮度值。

绝对湿度模型

Goward S N, Waring R H, Dye D G et al：对水獭的生态遥感：卫星大尺度观测．Ecological Applications, 1994, 4(2)

$$\chi = \frac{e_a M_n}{RT}$$

式中，e_a 是水汽压力；M_m 水的分子质量；R 是普适气体常数；T 是绝对温度。

地面测量部分 I_{PAR} (%)和七月 AVHRR I_{ndv} 对俄勒冈州(美国州名)横断面测量之间的关系：

$$I_{PAR}(\%) = (121 I_{ndv}) - 4.0$$

式中，I_{PAR}(%)是地面测量百分数；附带被截取的 PAR；I_{ndv} 是正规化的差分植被指数。

热惯量及热扩散率模型

张永高：岩石的热惯量研究．环境遥感，1994，9(3)

(1) 热惯量模型：

$$P = \sqrt{K\rho C}$$

式中，K 为热传导率；C 为比热容；ρ 为密度。

(2) 热扩散率 κ 模型：

$$\kappa = \frac{K}{\rho C}$$

覆盖度损耗模型

Pickup G, bastin G N, Chewings V H：基于遥感的对于大规模商业放牧状况下非均衡牧场的状态估计．Ecological Applications, 1994, 4(3)

覆盖度损耗模型把一次植被生长脉动之后的落叶率和放牧动物的分布关联起来：

$$C_{x,t} = C_{x,0}\exp\{-\alpha[(1-d)F_x + d]t\}$$

式中，$C_{x,t}$ 是在时间 t 和与水源的距离为 x 的条件下，从一个初始的覆盖度 $C_{x,0}$ 发展到的一个剩余植被覆盖度；F_x 是一个空间上的可变函数，描述了距水源距离不同的条件下，覆盖度衰减的速率；d 是一个覆盖度

变化的空间恒定速率；α 是一个常量，它与现存的家畜的数目和覆盖度自然衰退速率有关。

观测和分析反演方程

刘锦丽，李放，吕达仁：长春净月潭遥感实验场大气光学特性研究．环境遥感,1994，9(3)

(1) 消光公式：

$$E(\lambda)=\{E_0(\lambda)\exp[-m_r\tau(\lambda)]\}/r_d^2$$

式中，$E_0(\lambda)$ 为地外太阳辐照谱；$\tau(\lambda)$ 为垂直气柱(大气质量为 1)大气总光学厚度；m_r 为大气质量；r_d 为日地距离与日地平均距离之比值。

(2) 反演方程：

$$f=\left(A^{\mathrm{T}}A+\gamma H\right)^{-1}A^{\mathrm{T}}\tau_a$$

式中，A，A^{T} 为系数矩阵及其转置；γ 为 Lagrange 光滑因子；H 为光滑矩阵。

SAVR 法分维估计与方向分维纹理度量模型

陶闯，林宗坚：SAVR 法——影像表面分维估计的新方法．环境遥感，1994，9(3)

(1) SAVR 法分维估计值 D_2 模型：

$$\lg\left[\bar{S}(r)/r^2\right]=D_2\lg\left[\bar{V}(r)^{\frac{1}{3}}/r\right]+c$$

(2) 纹理特征度量模型：

能量：$E=\frac{1}{n}\sum_i D_i$

方向：$D(D)=\min_i\{D_i\}$

方向强度：$D_{\mathrm{MAG}}=2-\min_i\{D_i\}$

散度：$D=\sum_i|D_i-E|$

式中，D_i 为 i 方向的分维估计量；D 为散度。

薄云覆盖下水体的气象卫星识别模型

盛永伟，肖乾广：应用气象卫星识别薄云覆盖下的水体．环境遥感，1994，9(4)

(1) 纹理特征模型：

$$S_4=\sqrt{\frac{1}{9}\sum_{i=1}^{9}\left(V_i-\bar{V}\right)^2}$$

式中，$V_i\,(i=1,\cdots,9)$ 为窗口中的亮温值；$\bar{V}$ 为窗口中的亮温平均值。

(2) 云覆盖下水体的识别模型：

$$S_i=C_i+G_i+P_i$$

式中，i 为通道号；S_i 为第 i 通道传感器接收到的值；C_i 为底 i 通道来自云的那部分信息；G_i 为第 i 通道来自云下地表的信息；P_i 为第 i 通道大气程辐射。

(3) 云影中水体的识别模型：

$$S_i=G_i+P_i=A_iE_i+P_i$$

式中，A_i 为第 i 通道地物反射率；E_i 为第 i 通道地物接收到的辐射能量。

水稻遥感动力估产模拟的建模方法

杨星卫，薛王平，陆贤：水稻遥感动力估产模拟初探，环境遥感，1994，9(4)

(1) 绿度值 I_{dv} 与叶面积指数 I_{la} 的关系式：

$$I_{\mathrm{dv}}(t)=a_2+b_2\ln I_{\mathrm{la}}(t)$$

式中，a_2 和 b_2 为回归参数。

(2) 水稻叶面积比叶重(Q)的动态变化模式：

$$Q(t)=a_0+(a_f-a_0)\times\exp\left[-C(d-t)^2/t^2\right]$$

式中，a_0 和 a_f 分别为移栽初期及齐穗期的比叶重；C, d 为回归参数。

(3) 叶片干物重 $\hat{W}_L(t)$ 的模型：

$$\hat{W}_{\mathrm{L}}(t)=H\,I_{\mathrm{la}}(t)/Q(t)$$

式中，H=667，为亩与 m^2 的转换系数；其他同上。

(4) 分配系数 R 模型：

叶：$R_{\mathrm{L}}(t)=\dfrac{W_{\mathrm{L}}(t+1)-W_{\mathrm{L}}(t)}{W(t+1)-W(t)}$

茎梢：$R_{\mathrm{S}}(t)=\dfrac{W_{\mathrm{S}}(t+1)-W_{\mathrm{S}}(t)}{W(t+1)-W(t)}$

穗：$R_{\mathrm{SO}}(t)=\dfrac{W_{\mathrm{SO}}(t+1)-W_{\mathrm{SO}}(t)}{W(t+1)-W(t)}$

$$R_{\mathrm{L}}(t)+R_{\mathrm{S}}(t)+R_{\mathrm{SO}}(t)=1$$

式中，$W_{\mathrm{L}}(t)$，$W_{\mathrm{S}}(t)$ 和 $W_{\mathrm{SO}}(t)$ 分别为 t 时刻叶、茎梢和穗的干重实测值；$W(t)$ 为总干重的实测值。

线性 2^m 叉数的自然数编码及其收敛性分析

方涛、郭达志：概括模型下的线性 2^m 叉数的自然数编码 环境遥感，1994，9(4)

(1) 线性 2^m 叉数的自然数编码的实用公式：

$$N=\sum_{i=1}^{m}2^{i-1}\sum_{k=0}^{\mathrm{INT}(\log_2 I_{i0})}\mathrm{MOD}(I_{ik},2)\cdot 2^{mk}$$

$$I_{ik}=\mathrm{INT}(I_{i(k-1)}/2)\quad (k>0)$$

(2) M 为图像恢复时的逆变换模型：

$$I_i=\sum_{k=n-1}^{k=0}\mathrm{MOD}(T_k,2)\cdot 2^k\quad (i=1,\cdots,m)$$

$$T_k=\mathrm{INT}\left[N_k/(2^m)^k\cdot 2^{i-1}\right]=\mathrm{INT}\left(N_k/2^{mk+i-1}\right)$$

式中，K 的初值为 $K=\mathrm{INT}\left[\frac{1}{m}(\log_2 N+1-i)\right]$，当 $K<n-1$ 时，$N_k=\mathrm{MOD}(N_{k+1},T_{k+1}\cdot 2^{mk+m+i-1})$；当 $K=n-1$ 时，$N_k=N$。

TM 影像配准及其作物估产方法的精度检验模型

刘茜，徐希孺：航空影像与 TM 影像的配准及用航空影像对 TM 进行作物估产方法的精度检验，环境遥感，1994，9(4)

(1) TM 影像的纠正公式：

$$L(x,y)=L_0+\lambda^{-1}\left[\lambda L_g(x,y)M(u,v)\right]$$

式中，L_0 为路径辐射项，是大气直接散射太阳辐射进入传感器的部分；λ 和 λ^{-1} 分别为傅里叶变换及其逆变换；$L_g(x,y)$ 为没有大气效应的地面辐射场；$M(u,v)$ 为二维空间频率域的大气光学调制函数。

(2) 用空间频谱-相关方法进行配准的相关系数 $R_{xy}(\bar{i})$ 模型：

$$R_{xy}(\bar{i})=\sum_{n=0}^{N-1}X_{\bar{i}}(n)Y(n)$$

(3) 混合光谱反射率 $\rho_{i,j}$ 模型：

$$\rho_{i,j}=\sum_{k=1}^{n}a_{i,k}\rho_{k,j}$$

式中，i 为空间位置；j 为波段数；$a_{i,k}$ 为第 k 类地物在第 i 个像元中所占的面积百分比；k 为某地物类型；$\rho_{k,j}$ 为某类地物的波谱特征。

陆地表面状态参数估计的遥感算法

Hall F G, Townshend J R, Engman E T：陆地表面状态参数估计遥感算法的现状 Remote Sensing of Environment, 1995, 51

(1) 裸露表面土壤水分的被动式微波遥感是利用辐射计测量从土壤表面的辐射强度。这个辐射正比于地表温度 T_{soil} 和地表辐射系数 ε 之积，ε 依赖于土壤的介电常数及地表粗糙度，这一般被称为微波亮度温度：

$$T_B=\varepsilon T_{soil}$$

(2) 裸露土壤的主动微波测量方法即是测量雷达波的后向散射 σ_s，其能够直接与土壤水分联系起来：

$$\sigma_s=f(\mathcal{R},a,M_v)$$

式中，$\mathcal{R}$ 是表示表面粗糙度的项；a 是表示土壤水分敏感度的项；M_v 是土壤水分的体积含量。

利用微波亮度温度估计近地面空气温度的经验模型

Shuman C A, Alley R B, Anandakrishnan S et al：从 SSM/I 亮度温度估计格陵兰中部近地面空气温度的经验性方法 Remote Sensing of Environment, 1995, 51

(1) 微波亮度温度(T_B)与近地面雪温(T_s)的一阶关系：

$$T_B=\varepsilon T_s$$

式中，ε 是近地面雪和冰的辐射系数。

(2) 假设 T_s 被空气温度(T_A)控制，则：

$$\varepsilon=T_B/T_A$$

模拟的辐射系数趋势和根据卫星观测得到的 T_B 的组合可用于近似估计近地面空气温度(T_C) 趋势：

$$T_C=T_B/e$$

生物物理参数的反演算法

Jacquemoud S, Baret F, Andrieu B et al：利用 PROSPECT+SAIL 模型从耦用甜菜叶冠反演数据反推植物的生物物理参数——TM 和 AVIRIS 传感器的应用。Remote Sensing of Environment, 1995, 52

在很多例子中，叶冠反射模型的复杂性限制了解析性的反演，因此这里需要一个优化的数值方法。考虑有 p 个参数的模型 M，矢量 X 是解释性变量，矢量 Y 是观测变量，X 与 Y 的关系可表示为：

$$Y=M(\Theta,X)+\varepsilon$$

式中，Θ是 p 个未知参数，如果 n 是观测变量的个数，反演的算法即是确定使目标函数 $S(\Theta)=\sum_{i=1}^{n}[Y_i-M(\Theta,X_i)]^2$。

尘土反射率、面积百分比及负荷之间的关系模型

Keller J, Lamprecht R：利用道路尘土作为大气污染迁移和沉积的指示器：SPOT 图像的一个应用．Remote Sensing of Environment, 1995, 54

(1) 尘土地面反射率ρ与尘土面积百分比f之间的关系：

$$f=\frac{\rho-\rho_v}{\rho_d-\rho_v}$$

式中，ρ_v 是完全植被覆盖的表面的反射率；ρ_d 是完全被尘土覆盖的表面的反射率。

(2) 尘土面积百分比f与尘土负荷之间的关系：

$$u=-\frac{4}{3}\rho_p\frac{\overline{r^3}}{\overline{r^2}}\frac{1}{\ln(1-f)}$$

式中，$\overline{r^2}$ 和 $\overline{r^3}$ 分别是尘土分布 r^2 和 r^3 的平均值；ρ_p 是体积密度。

计算日土壤水分蒸发蒸腾损失总量的积分值法

Carlson T N, Capehart W J, Gillies R R：对日土壤水分蒸发蒸腾损失总量的遥感的一个简化方法的新考虑．Remote Sensing of Environment, 1995, 54

$$Rn_{24}-LE_{24}=B(T_{013}-T_{a13})^n$$

式中，Rn_{24} 和 LE_{24} 分别是对一天中 24 小时进行积分得到的地面净辐射量和土壤水分蒸发蒸腾损失总量；T_{013} 和 T_{a13} 分别是在 1300 当地时间表面辐射温度和 50m 高处大气温度；B 和 n 是伪常数，且：

$$B=0.0175+0.5(F_r)\quad(\pm0.002)$$

$$n=1.004-0.335(F_r)\quad(\pm0.053)$$

或

$$B=0.0109+0.051(N^*)\quad(\pm0.003)$$

$$n=1.067-0.372(N^*)\quad(\pm0.089)$$

式中，F_r 是植被覆盖率；N^* 定义为比例 I_{ndv}，且 $N^*=\frac{I_{ndv}-I_{ndv0}}{I_{ndvs}-I_{ndv0}}$，$I_{ndvs}$ 是在 100% 植被覆盖时的 I_{ndv}，I_{ndv0} 是裸地的 I_{ndv} 值。

实际中发现 F_r 和 N^* 存在以下关系：

$$F_r\approx(N^*)^2$$

fBm 纹理分析模型

江平，石世民：fBm 纹理分析模型及其在岩性识别中的应用．环境遥感，1995，10(1)

(1) 分数布朗运动函数模型：

$$P_r\left(\frac{B_H(r+\Delta r)-B_H(r)}{\|\Delta r\|^H}<w\right)=F(w)$$

式中，$B_H(r+\Delta r)$ 为分数布朗运动；Δr 为坐标矢量 r 的增量；$\|\Delta r\|$ 为坐标矢量增量的模；$F(w)$ 为积累分布函数。

(2) 影像灰度场的 fBm 模型：

$$I(x,y)=\rho\lambda N\cdot L$$

式中，$I(x,y)$ 为影像灰度场亮度值；ρ 为面的反射率；λ 为辐照度；L 为入射光的入射方向。

渍害遥感的理论识别模型

俞光明：渍害遥感识别的基本原理与方法．环境遥感，1995，10(1)

(1) 土壤热惯量 P_j 与含水量 W_j 模型：

$$P_j=\frac{\sum_{i=t_1}^{t_2}R_{nij}\left(1-\xi_{ij}\Theta_i+\frac{W_\theta-u}{W_f-W_\theta}\cdot\eta_i\right)\Delta}{\sqrt{t_2-t_1}(T_2-T_1)+\sum_{i=t_1}^{t_2}\frac{kLE_0}{W_f-W_\theta}\Delta}$$

$$W_j=\frac{k\sum_{i=t_1}^{t_2}R_{nij}\left(1-\xi_{ij}\Theta_i+\frac{W_\theta-u}{W_f-W_\theta}\cdot\eta_i\right)\Delta}{\sqrt{t_2-t_1}(T_2-T_1)+\sum_{i=t_1}^{t_2}\frac{kLE_{0i}}{W_f-W_\theta}\Delta}-u$$

式中，P_j 和 W_j 分别为第 j 像元的土壤热惯量和含水量；R_n 为净辐射通量；ξ 为显热通量比；Θ为显热通量与净辐射通量的比值；W_f，W_θ 分别为某种土壤的调萎系数和田间持水量；LE_0 为潜热通量；k，u 为待定系数。

(2) 渍害田土壤温度变化模型：

$$T(z,t)=29.7-0.04z+4e^{-0.1446z}\sin(0.262t-0.72-0.66z)$$

式中，$T(z,t)$ 为深度 z 处 t 时刻的土壤温度。

纹理测度模型

邵芸，郭华东，刘浩等：鲁东地区的星载 SAR 地质探测．环境遥感，1995，10(1)

$$熵：ENT=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}-P_\delta(i,j)\cdot\ln P_\delta(i,j)$$

$$角二阶矩：ASM=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}P_\delta(i,j)^2$$

$$反差分：HOM=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}P_\delta(i,j)\Big/\left[1+(i-j)^2\right]$$

式中，$P_\delta(i,j)$ 为在 (i,j) 处的像元定义为灰度为 i 的像元移动某一特定距离与所遇像元灰度为 j 这种情况出现的概率；N 为图像某一区域的灰阶个数。

烃类微渗漏信息计算机提取的 OIF 指数

耿德方：烃类微渗漏象及其信息提取．环境遥感，1995，10(2)

$$OIF=\sum_{i=1}^{3}S_i\Big/\sum_{j=1}^{3}\left|R_{ij}\right|$$

式中，S_i 为标准差；R_{ij} 为相关系数。

微观像纹理与宏观像纹理提取方法

刘浩，郭华东：雷达图像纹理信息的提取及在地学分析中的利用．环境遥感，1995，10(2)

(1) 灰度共现矩阵模型：

$$熵：ENT=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}-P_\delta(i,j)\ln P_\delta(i,j)$$

$$角二阶矩：ASM=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}P_\delta(i,j)^2$$

$$同性质：HOM=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}P_\delta(i,j)\Big/\left[1+(i-j)^2\right]$$

$$非相似度：DIS=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left|i-j\right|P_\delta(i,j)$$

式中，$P_\delta(i,j)$ 为灰度共现矩阵中位置 (i,j) 处的像元的值。

(2) 分维 D 模型：

$$D=\lim_{\varepsilon\to 0}\lg N(\varepsilon)/\lg(1/\varepsilon)$$

式中，ε 为选定区域所分格子的边长；$N(\varepsilon)$ 为格子数目。

植被指数模型

梁先祥，杨晓明：应用遥感信息复合方法的森林分类和动态监测研究．环境遥感，1995，10(2)

$$ND_{ij}=\frac{MSS_{T(K)ij}-MSS_{S(K)ij}}{MSS_{T(K)ij}+MSS_{S(K)ij}}\times C$$

式中，ND 为归一化植被指数；K 为时相；i,j 分别为行、列；C 为常数。

纹理特征测量及迭代四叉树分割模型

常晋义，张渊智：基于知识的迭代四叉树分割．环境遥感，1995，10(4)

(1) 聚类比率模型：

$$R_k(i,j)=\frac{\left|m_k(i)-m_k(j)\right|}{\sigma_k(i)+\sigma_k(j)}$$

式中，$R_k(i,j)$ 为纹理类型 i 和 j 的聚类比率；$m_k(i)$ 和 $m_k(j)$ 分别为类型的中值；$\sigma_k(i)$ 和 $\sigma_k(j)$ 分别为类型 i,j 的标准偏差。

(2) 粗糙测量(CM)模型：

$$CM=\frac{1}{16}\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=i+1}^{4}(m_i-m_j)^2$$

式中，m_i 为面积 A_i 中值。

树冠叶面积体密度 $L(x,y,z)$ 模型

王锦地，李小文，Strahler A H：树冠叶面积体密度和叶面积指数的间接估值方法研究．环境遥感，1995，10(4)

$$L(x,y,z)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{-\ln P_{\text{gap}}(\theta_i)}{K(\theta_i)S(\theta_i)}$$

式中，$P_{\text{gap}}(\theta)$ 为单位立体角内射线穿透冠层的概率；K 为该体积元叶面积在给定方向上的投影系数；S 为射线穿过树冠内的路径长度；θ 为射线方向的天顶角。

纹理监测函数器及其多尺度分析模型

张继贤，李德仁：影响纹理的多尺度分析．环境遥感，1996，11(1)

1. 影像纹理元监测器函数——纹理监测器

(1) 2D Gabor 函数 $g(x,y)$ 模型：

$$g(x,y)=\frac{1}{2\pi\lambda\sigma^2}\exp\left[-\frac{(x/\lambda)^2+y^2}{2\sigma^2}\right]$$

式中，λ 为纵横比；σ 为尺度参数。

(2) 纹理检测器参数模型：

$$B=\log_2[(1+0.1874/\sigma f_0)/(1-0.1874/\sigma f_0)]$$

式中，B 为带宽；σ 为高斯尺度因子；f_0 为中心频率。

2. 基于纹理检测器的多尺度纹理分析

(1) 多尺度分解函数 $G(x,y)$ 模型：

$$G(x,y)=\exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{x-x_0}{\lambda\sigma}\right)^2+\left(\frac{y-y_0}{\sigma}\right)^2\right]\right\}\times \sin[2\pi f(x\cos\theta-y\sin\theta)+\varphi]$$

(2) 小波变换法多尺度分解模型：

$$W_{2^j}^i f(\theta,x_0,y_0)=\iint f(x,y)\psi_{2^j}^i(x-x_0,y-y_0,\theta)\mathrm{d}x\mathrm{d}y \quad j=1,2$$

3. 多尺度纹理分析中的信息融合机制

(1) 竞争制约模型：

局部的空间竞争制约模型：

$$\begin{cases}\Delta X(s,\theta)=-a_{s,\theta}X(s,\theta)+I(s,\theta)-\sum\limits_{s'\in N_s}b_{s,s'}Y(s',\theta)\\ Y(s,\theta)=g[X(s,\theta)]\end{cases}$$

同一位置不同方向的竞争制约模型：

$$\begin{cases}\Delta X(s,\theta)=-a_{s,\theta}X(s,\theta)+I(s,\theta)-\sum\limits_{\theta'\neq\theta}b_{\theta,\theta'}Y(s,\theta')\\ Y(s,\theta)=g[X(s,\theta)]\end{cases}$$

局部尺度竞争制约模型：

$$Q_{ij}(x,y,\theta)=g[\alpha_1 I_i(x,y,\theta)-\alpha_2 I_j(x,y,\theta)]$$

式中，$Y(s,\theta)$ 为给定尺度、方向 θ 处，一个单元在位置 $S=(x,y)$ 点处的输出；$I(s,\theta)$ 为以前处理步骤向该单元的激发输入；N_s 为 $S=(x,y)$ 的局部空间域；a 和 b 为权值；g 按不同状况取相应的函数。

(2) 合作融合模型：

$$Z_i(s,\theta)=g\int d_i(s-s',\theta)[Y_i(s',\theta)+Q_{ij}(s',\theta')]\mathrm{d}s'$$

式中，$d_i(s,\theta)$ 为 $Z_i(s,\theta)$ 的感受野；θ 为所在方向；θ' 为垂直于 θ 的方向。

微波信号传输的雷达方程

李震，曾群柱：合成孔径雷达影像提取雪盖信息研究. 环境遥感，1996，11(3)

$$P_r=\frac{P_t G_t}{L_t}\cdot\frac{1}{4\pi r_t^2 L_{mt}}\cdot\sigma_A\cdot\frac{1}{4\pi r^2 L_{mt}}\cdot\frac{G_r\lambda^2}{4\pi L_r}\cdot\frac{1}{L_p}$$

式中，P_r 为接收机功率；P_t 为发射机功率；L_r 为接收系统损耗系数；L_t 为发射系统损耗系数；L_{mr} 为媒质中接收损耗系数；L_{mt} 为媒质中发射损耗系数；r_t 为发射机与目标间距；r 为接收机与目标间距；G_t 为目标方向上发射机天线增益；G_r 为目标方向上接收机天线增益；σ_A 为雷达散射截面；L_p 为极化损失系数；λ 为雷达波长。

几种主要消除斑点噪声滤波处理算法的数学模型

唐伶俐，江平，戴昌达，Thomas J. Jackson：星载 SAR 图像斑点噪声消除方法效果的比较研究. 环境遥感，1996，11(3)

(1) 均值平滑滤波模型：

$$R_{i,j}=\frac{1}{n^2}\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{n}DN_{i,j}$$

式中，$R_{i,j}$ 为平滑处理后的像元灰度值；$DN_{i,j}$ 为平滑模板内各像元的原始灰度值；n^2 为平滑模板的大小。

(2) Frost 自适应滤波模型：

$$R_{i,j}=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}(P_{i,j}\times M_{i,j})\Big/\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}M_{i,j}$$

$$M_{i,j}=\exp(-A_{i,j}\cdot T_{i,j})$$

$$A_{i,j}=DAMP\cdot\left(V_{i,j}/I_{i,j}^2\right)$$

式中，$R_{i,j}$ 为平滑处理后的像元灰度值；$P_{i,j}$ 为平滑模板中各像元的原始灰度值；$M_{i,j}$ 为平滑模板中每个对应像元的权重指数；$T_{i,j}$ 为平滑模板内中心像元到其邻像元的绝对距离；$DAMP$ 为指数衰减值；$V_{i,j}$ 为平滑模板中像元值的方差；$I_{i,j}^2$ 为平滑模板中像元值的均值平方；n^2 为平滑模板的大小。

(3) Lee 自适应滤波模型：

$$R=I+K(CP-UI)$$

$$K=\frac{U\cdot V}{VU^2+I^2M_{\text{VAR}}}$$

$$M_{\text{VAR}}=\left(\frac{SD}{I}\right)^2$$

式中，R 为平滑处理后的像元灰度值；I 为平滑模板中像元值的均值；CP 为平滑模板中心点像元灰度值；U 为相乘噪声的均值；V 为平滑模板中像元值的方差；SD 为平滑模板内的噪声标准差。

(4) 改良 K——均值自适应滤波模型：

$$R_i = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} DN_i$$

$$k = n^2(1 - Sf)$$

$$Sf = \frac{V_{\text{Loc}} - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}}$$

式中，R_i 为平滑处理后的像元灰度值；DN_i 为平滑模板中各像元的原始灰度值；V_{Loc} 为平滑模板中像元值的方差；$V_{\min}$ 为整个研究区域最小方差值；$V_{\max}$ 为整个研究区域最大方差值；n^2 为平滑模板的大小。

空间域滤波模型

王志刚，李林：中亚天山地区横向构造的航天遥感分析．环境遥感，1996，11(4)

$$g(i,j) = \sum_{K=i-w}^{i+w} \sum_{I=j-w}^{j+w} f(K,I)h(i-K, j-I)$$

式中，f 为输入图像；h 为滤波函数；g 为滤波后的输出图像，通常选择 $n \times n$ 的矩阵算子作为滤波数。

太阳直射光谱遥感大气柱水汽总量模型

李放，吕达仁，刘锦丽：利用太阳直射光谱遥感大气柱水汽总量的研究．环境遥感，1996，11(4)

(1) 透过率 $\tau_{\text{wa}\lambda}$ 模型：

$$\tau_{\text{wa}\lambda} = \exp\left[\frac{-0.2385k_{\text{wa}\lambda}wm_r}{(1+20.07k_{\text{wa}\lambda}wm_r)^{0.45}}\right]$$

$$m_r = \left[\cos\theta_Z + 0.15(93.885 - \theta_Z)^{-1.253}\right]^{-1}$$

式中，$k_{\text{wa}\lambda}$ 为水汽吸收系数；w 为水汽总量；m_r 为标准压力下大气质量(无量纲)，θ_Z 为太阳天顶角。

(2) 水汽总量 w' 模型：

$$w' = \int_z^{\infty} \frac{6110R_{\text{H}}(z)10^{\frac{7.5t(z)}{237.3+t(z)}}}{4.615T(z)}\mathrm{d}z$$

式中，z 为几何高度；$R_{\text{H}}(z)$ 为相对湿度；$t(z)$ 为气温；$T(z)$ 为绝对温标。

TM 图像数字镶嵌的坐标变换及其精度模型

马钟荻，刘建波：TM 图像数字镶嵌的几何精度分析及镶嵌方法的探讨．环境遥感，1996，11(4)

(1) 坐标变换模型：

$$U = a_0 + a_1P + a_2L$$

$$V = b_0 + b_1P + b_2L$$

式中，P, L 和 U, V 分别为图像 A 和 B 的坐标；a, b 均为变换系数。

(2) TM 数字镶嵌图像几何精度 e 模型：

$$e = \sqrt{\frac{1}{n}\sum(\Delta S_i)^2}$$

$$\Delta S_i = S_{mi} - S_{ri}$$

$$(i = 1,2,\cdots,n)$$

式中，S_{mi} 为第 i 条线段在图像上的计算长度；S_{ri} 为其实际长度；n 为线段总数。

普朗克方程——光谱辐射强度

万余庆，张祥民：应用 DTM 改善煤层自然的热红外探测．环境遥感，1996，11(4)

$$L_{\lambda T}^{BB} = C_1 \Big/ [\lambda^5 \cdot (e^{C_2/\lambda T} - 1)]$$

式中，T 为温度；C_1 和 C_2 为常数。

遥感影像纹理分类模式

朱长青，杨晓梅：具有更佳分辨率小波分解的遥感影像纹理分类．地理研究，1997，16(1)

(1) 离散图像分解公式：

$$\begin{cases} d_{n,m}^{k} = \sum\limits_{j,l\in Z} \bar{h}_{j-2n}\bar{h}_{l-2m}C_{j,l}^{k-1} \\ d_{n,m}^{k1} = \sum\limits_{j,l\in Z} \bar{h}_{j-2n}\bar{g}_{l-2m}C_{j,l}^{k-1} \\ d_{n,m}^{k2} = \sum\limits_{j,l\in Z} \bar{g}_{j-2n}\bar{h}_{l-2m}C_{j,l}^{k-1} \\ d_{n,m}^{k3} = \sum\limits_{j,l\in Z} \bar{g}_{j-2n}\bar{g}_{l-2m}C_{j,l}^{k-1} \end{cases}$$

式中，$\{d_{n,m}^{k1}\}_{k=1}^{N}$ 为各层次的竖直边缘图；$\{d_{n,m}^{k2}\}_{k=1}^{N}$ 为各层次的水平边缘图；$\{d_{n,m}^{k3}\}_{k=1}^{N}$ 为各层次的斜边缘图；$\{d_{n,m}^{k}\}_{k=1}^{N}$ 为各层次的模糊像(低频成分)。

(2) 将能量作为特征值的转换公式：

$$e = -\sum_{i,j}|p(i,j)|\lg|p(i,j)|$$

式中，$p(i,j) = \dfrac{|C(i,j)|^2}{\sqrt{\sum\limits_{i,j}|C(i,j)|^2}}$；$e$ 为能量；$C(i,j)$ 为图

像在(i,j)处的灰度值。

基于 FPAR 的简化生长模型

Clevers J G P W：基于光学遥感数据预报糖用甜菜产量的一个简化方法．Remote Sensing of Environment, 1997, 61

(1) 干物质量(DM)：

$$DM = e\int_0^t A_{PAR}(t)\mathrm{d}t$$

式中，e是辐射能量转化为植物干物质的基本为常数的系数因子；$A_{PAR}(t)$是日吸收的光合作用有效辐射(A_{PAR})。

(2) 从发芽到收割期间积累的干物质：

$$DM = e\cdot\int_{发芽时}^{收割时} F_{PAR}(t)\cdot PAR(t)\mathrm{d}t$$

式中，$PAR(t)$是日光合作用有效辐射；$F_{PAR}(t)$是PAR中被植物吸收的比例系数，可以根据遥感观察估计。

(3) 农作物产量可表示为：

$$Y = a + b\cdot\int_{发芽时}^{收割时} F_{PAR}(t)\cdot PAR(t)\mathrm{d}t$$

式中，a 和b是回归系数。

叶、土壤反射模型

Fourty，Baret F：从顶部大气反射数据估计植被中水分及干物质的含量．Remote Sensing of Environment, 1997, 61

(1) 叶的光学性质：

叶的吸收系数K为：

$$K = k_w C_w + k_{slw} S_{lw}$$

式中，k_w 和k_{slw}是相应的水分和干物质的吸收系数；C_w是单位叶面水分含量($g\cdot cm^{-2}$)；S_{lw}是相应的叶片重量($g\cdot cm^{-2}$)。

(2) 土壤的反射性质：

土壤的湿度效应可用下式描述：

$$\rho_s = [p\rho_{s,b} + (1-p)\rho_{s,d}]e^{-k_w m}$$

式中，ρ_s是土壤的反射率；$\rho_{s,b}$和$\rho_{s,d}$分别是干燥的明亮的和暗的土壤的反射率；p是明亮土壤的丰度；m是土壤湿度(cm)；k_w是相应的纯水的吸收系数。

雪灾判别模型

冯学智，鲁安新，曾群柱：中国主要牧区雪灾遥感监测评估模型研究．遥感学报，1997，1(2)

$$Z_g(X) = \ln P_g + C_{og} + C_g^{(r_1)}X^{(r_1)} + \cdots + C_g^{(r_l)}X^{(r_l)}$$

$$C_g^{(r_i)} = (m-G)\sum_{j=1}^{l} W^{r_i r_j}\overline{X}_g^{(r_j)}$$

$$C_{og} = -\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{l} C_g^{(r_i)}\overline{X}_g^{(r_i)}$$

式中，$i=1,2,\cdots,l$；$g=1,2,\cdots,G$；X为判别因子矩阵；G为雪灾的等级；L为选取的判别因子数；C_{og}为常数；$C_g^{(r_i)}$为判别系数；P_g为灾情等级划分的先验概率。

生物变量的高光谱估计模型

张良培，郑兰芬，童庆禧：利用高光谱对生物变量进行估计．遥感学报，1997，1(2)

(1) 吸收有效光合辐射面积S_{Apar}模型：

$$S_{Apar} = R'/R'_L$$

式中，R'为混合光谱；R'_L为植物的纯分量光谱。

(2) 叶面积指数I_{la}模型：

$$I_{la} = \frac{1}{K}\left[\ln R'_L - \ln(R'_L - R')\right]$$

式中，K为植被的消减系数。

卫星遥感估测土壤水分的相关模型

刘培军，张麟等：卫星遥感估测土壤水分的一种方法。遥感学报，1997，1(2)

(1) 土壤水分与光谱反射率R的关系模型：

$$R = ae^{bP}$$

式中，p为土壤水分百分数；a和b为待定系数。

(2) 土壤反射率与辐亮度的关系模型：

$$R_n = AB_n - b$$

式中，R_n为某波段土壤平均反射率；B_n传感器相应波段的平均辐亮度；A，b为与仪器对波段频率响应和仪器灵敏度有关的系数和常数。

(3) 光学植被盖度C_{vo}模型：

$$C_{vo} = \frac{B_4 - B_{23} - r_{so}}{B_{4植} - B_{23植} - r_{so}}$$

式中，B_4为 4 波段的光谱亮度；B_{23}为 2, 3 波段的平均光谱亮度；$B_{4植}$为理想的全植被光学信息时的 4 波段的光谱亮度；$B_{23植}$为理想的全植被光学信息时的 2, 3 波段平均光谱亮度；r_{so}为一常数，在数值上等于

裸土壤的 $B_{4|}$ 和 $B_{23|}$ 的差值，其意义为裸土壤的虚生物量本底。

(4) 土壤的光谱亮度 $B_{4|}$ 模型：

$$B_{4|}=\frac{B_4-C_{vo}B_{4植}}{1-C_{vo}}$$

双层热平衡模型

隋洪智，田国良，李付琴：农田蒸散双层模型及其在干旱遥感检测中的应用．遥感学报，1997，1(3)

$$LE=\frac{\rho C_P}{\gamma}\frac{e_0-e_a}{r_a}$$

$$H=\rho C_P\frac{T_0-T_a}{r_a}$$

式中，L 为潜热通量；EH 为显热通量；ρ 为空气密度；C_P 为空气定压比；T_0 和 e_0 分别为冠层中空气温度和水汽压；T_a 和 e_a 分别为参考高度处的空气温度和水汽压；r_a 为冠层与参考高度处空气热交换阻抗。

灰度变化的平流方程

黄润恒，刘清华：从卫星遥感图像序列计算辽东湾海冰运动速度矢量．遥感学报，1997，1(4)

$$\frac{dg}{dt}=\frac{\partial g}{\partial t}+v\nabla g=0$$

TIMS 图像的定标处理与温度图像的生成模型

濮静娟，董卫东，关燕宁等：热红外遥感用于陡河水库生态环境研究．遥感学报，1997，1(4)

(1) 黑体辐射能量 L_j^{BB} 模型：

$$L_j^{BB}=\frac{C_1}{\lambda_j^5\pi\left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda_j T}\right)-1\right]}$$

式中，λ_j 为第 j 通道的波长；T 为黑体温度；C_1 为第1辐射常数；C_2 为第2辐射常数。

(2) 模式温度 $T(\mathrm{K})$ 模型：

$$T(\mathrm{K})=\frac{C_2}{\lambda_j\ln\left(\frac{\varepsilon_j C_1}{\lambda_j^5 L_j\pi}+1\right)}$$

式中，ε_j 为常数。

Kappa 系数

黎夏，叶嘉安：利用主成分分析改善土地利用变化的遥感检测精度——以珠江三角洲城市用地扩张为例．遥感学报，1997，1(4)

$$k=\frac{M\sum_{i=1}^{r}X_{ii}-\sum_{i=1}^{r}X_{i+}X_{+i}}{M^2-\sum_{i=1}^{r}X_{i+}X_{+i}}$$

式中，r 为误差矩阵的行数；X_{ii} 为 i 行 i 列上的观测值；X_{i+} 和 X_{+i} 分别为 i 行和 i 列上的观测值的总和。

图像分割中随机噪声的影响分析模型

杨文杰，刘浩学，秦臻等：图像分割中随机噪声的影响．遥感学报，1997，1(4)

(1) MAP 估计方法模型：

$$\ln P(S,G)=C+\sum_{(i,j)\in S_1}\ln P_{ij1}-\frac{1}{2\sigma^2}(g_{ij}-r_1)^2+\sum_{(i,j)\in S_2}\ln P_{ij2}-\frac{1}{2\sigma^2}(g_{ij}-r_2)^2$$

式中，C 为常数；P_{ijk} 为 Markov 场的转移概率；r 为灰度值；S 为网格点集；g 为特征指标。

(2) 模糊 C-均值方法——聚类中心向量 $V^{(l)}$ 模型：

$$V_i^{(l)}=\sum_{k=1}^{n}\left(r_{ik}^{(l)}\right)^q\cdot g_k\Big/\sum_{k=1}^{n}\left(r_{ik}^{(l)}\right)^q$$

$$r_{ik}^{(l+1)}=\frac{1}{\sum_{j=1}^{c}\left(\frac{\left\|g_k-V_i^{(l)}\right\|}{\left\|g_k-V_j^{(l)}\right\|}\right)^{\frac{2}{q-1}}}\quad(\forall i,\forall k)$$

(3) 类分离指标 σ_B 模型：

$$\sigma_B=\frac{(\mu_T\omega_k-\mu_k)^2}{\omega_k(1-\omega_k)}$$

式中，μ_T 和 μ_k 分别为灰度均值和类均值；ω_k 为类直方图。

(4) 聚类效果指标 F 模型：

$$F=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c}r_{ik}^2$$

样条二进小波的影像多尺度边缘检测模型

朱长青，杨晓梅，陶大欣：基于样条二进小波的影像多尺度边缘检测．遥感学报，1997，1(4)

(1) 二进小波变换模型：

$$W_s^a f(x) = s\frac{d}{dx}(f \cdot \theta_s)(x)$$

$$W_s^b f(x) = s^2\frac{d^2}{dx^2}(f \cdot \theta_s)(x)$$

(2) 基于样条二进小波的影像多尺度边缘检测算法模型：

模为：

$$M_{2^j} f(x,y) = \sqrt{\left|W_{2^j}^1 f(x,y)\right|^2 + \left|W_{2^j}^2 f(x,y)\right|^2}$$

幅角为：

$$A_{2^j} f(x,y) = \arctan[(W_{2^j}^1 f(x,y))/(W_{2^j}^2 f(x,y))]$$

SSM/I 数据的信息获取数学模型

Grandell J, Pulliainen J, Hallikainen M：利用 SSM/I 数据对北部森林区进行像元内土地利用分类及获取森林树干体积信息. Remote Sensing of Environment, 1998, 63

(1) 单个像元的表面发射率估计的最小二乘法：

$$\min\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{7}\{(T_B)_{i,j} - g_{i,j}[e_i,(T_{\text{phys}})_j,\gamma]\}^2$$

式中，$(T_B)_{i,j}$ 是 SSM/I 导出的波段 $i(i=1,\cdots,7)$ 的第 j 次观测的亮度温度；N 是多时段观测的总次数；g 是亮度温度模型；e_i 是波段的表面发射率；γ 是定义平均大气透射率的常数。

(2) 亮度温度的模型 g 基于基本的发射传输方程：

$$g_{i,j} = e_i(T_{\text{phys}})_j t_i(\gamma_j) + \alpha_\uparrow(T_{\text{phys}})_j[1 - t_i(\gamma_j)] + \alpha_\downarrow(T_{\text{phys}})_j(1 - e_i)t_i(\gamma_j)[1 - t_i(\gamma_j)]$$

式中，$\alpha_\uparrow$ 和 $\alpha_\downarrow$ 分别是与大气透射率 t_i 有关的大气剖面因子。

(3) 土地利用分类的多元回归分析：

$$W_i = a_0 + a_1e_{19V} + a_2e_{19H} + a_3e_{22V} + a_4e_{37V} + a_5e_{37H} + a_6e_{85V} + a_7e_{85H}$$

式中，W_i 是从参考数据区获取的在单个像元内土地利用类型 i 所占的比例；a 是需要通过回归分析进行估计的未知常数；e 是通过半经验发射模型得到的像元的总的发射率。

土壤后向散射模型

Frison P L, Mougin E, Hiernaux P：季节性 ERS-1 风散射仪在 Sahel 北部(Mali)上空获取数据的观察及解译. Remote Sensing of Environment, 1998, 63

(1) 在 VV 极化方向上裸露土壤的后向散射系数 $\sigma^{\circ}_{\text{bare soil}}$ 给为：

$$\sigma^{\circ}_{\text{bare soil}}(\theta_i,\varepsilon_{r,s},ks) = \frac{g\cos^3\theta_i}{\sqrt{p}}[\Gamma_v(\theta_i) + \Gamma_h(\theta_i)]$$

式中，k 是波数；$\Gamma_u(\theta_i)$ 是对极化方向 $u(=v,h)$ 土地表面的 Fresnel 反射系数；θ_i 是入射角；p 是联合极化比 (copolarization ratio)；g 是决定于 ks 的经验因子。

(2) 对 V 极化方向，植被项的表达式为：

$$\sigma^{\circ}_{\text{vegetation}} = 4\pi\cos\theta_i n_0\left\langle\left|f_{vv}(-\hat{i},\hat{i})\right|^2\right\rangle\frac{1-L^2}{2\kappa_e}$$

式中，κ_e 是对 V 极化方向的消光系数；n_0 是单位体积的散射体的密度。

气候胁迫与草地 NDVI 时间积分关系的分析模型

Yang L, Wylie B K, Tieszen L L et al：美国北部和中部大平原上气候胁迫与草地的 NDVI 的时间积分之间关系的分析. Remote Sensing of Environment, 1998, 65

(1) I_{tindv} 为每个两周周期的 I_{ndv} 值从开始到季节末的求和：

$$I_{\text{tindv}} = \sum I_{\text{ndv}i}$$

式中，i 是从开始到季节末的第 i 个两周时间段；I_{ndv} 是归一化植被指数。

(2) 潜在蒸散量(ET_{p})利用 Penman 方程计算：

$$\rho_w L_v ET_p = [\Delta(R_n - G) + \gamma f(U)(e^* - e_a)]/(\Delta + \gamma)$$

式中，R_n 是全波段净辐射；G 是底层热通量；$f(U)$ 是风速函数；ρ_w 是液态水的密度；L_v 是蒸发潜热；Δ 是饱和水蒸气温度曲线在平均空气和表面温度的平均值时的斜率；γ 是湿度计常数；e^* 和 e_a 分别是饱和水蒸气压与空气实际气压。

(3) I_{tindv} 与气候的关系可假设为一个一般性模型，式中 T_{tindv} 表示为一系列气候变量的函数：

$$T_{\text{I NDVI}} = f[T(t), d_{\text{gd}}(t), P_{\text{t}}(t), ET_{\text{p}}(t), R_{\text{s}}(t), H_{\text{r}}(t)]$$

式中，T 是地表温度和土壤温度；d_{gd} 是生长期天数；P_{t} 是降水总量；ET_{p} 是潜在蒸散量；R_{s} 是太阳辐射；H_{r} 是空气的相对湿度。

高光谱数据的导数分析模型

Tsai F, Philpot W：高光谱数据的导数分析. Remote Sensing of Environment, 1998, 66

(1) Savitzky-Golay 平滑及求导计算：

简化的最小二乘卷积平滑法可表示为：

$$Y_j^* = \frac{\sum_{i=-m}^{m} C_i Y_{j+i}}{N}$$

式中，Y 是原始光谱；Y^* 是合成(平滑)光谱；C_i 是样条(平滑窗口)中第个光谱值的系数；N 是卷积数；指数 j 是正交坐标数据表的运行指数。

公式可重写为：

$$Y_j^* = \sum_{i=-m}^{m} P_i^{(0)} Y_{j+i}$$

式中，$P_i^{(0)}$ 是零阶求导计算中样条的第 i 个点的系数；Y_j 是平滑序列的中点值，相应地，中点的平滑的 q 阶导数表示为 $\frac{d^q \overline{Y_j}}{dx^q} = \sum_{i=-m}^{m} P_i^{(q)} Y_{j+i}$。

(2) Kawata 和 Minami 提出的线性最小二乘平滑法：

光谱观测值 $r(\lambda)$ 可描述为光谱的真实信号 $s(\lambda)$ 加上噪音 $n(\lambda)$：

$$r(\lambda) = s(\lambda) + n(\lambda)$$

式中，λ 是波长；去除噪音的光谱 $\hat{s}(\lambda)$ 可表示为 $\hat{s}(\lambda) = f(\lambda) r(\lambda) + g(\lambda)$，平均样条平滑可表达为 $\hat{s}(\lambda) = \frac{\sum s(\lambda_j)}{n}$。

从 AVHRR 短波波段估计 BRDF 的数学模型

Brien D M O, Mitchell R M, Edwards M et al：从 AVHRR 短波波段估计 BRDF：在澳大利亚半干旱站点进行试验，Remote Sensing of Environment, 1998, 66

(1) 二向反射分布函数(BRDF)模型：

反射辐射 I_r 与入射太阳辐射通量密度 F_i 间的关系式为：

$$I_r = \frac{F_i}{\pi} r \cos\theta_i$$

式中，r 是二向反射分布函数(BRDF)；入射与反射光线的方向记为天顶角与方位角 (θ_i, ϕ_i) 及 (θ_r, ϕ_r)，$\phi = \phi_i - \phi_r$。

(2) Staylor 和 Suttles 提出的沙漠 BDRF 模型：

$$r = p\bar{r}$$

式中，$\bar{r}$ 是 r 对方位角的平均值，其计算公式为 $\bar{r}(\mu_i, \mu_r) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} d\phi r(\mu_i, \mu_r, \phi)$，$\mu_i = \cos\theta_i$，$\mu_r = \cos\theta_r$。

(3) Staylor 和 Suttles 对 $\bar{r}$ 取参数值为：

$$\bar{r} = (a + bx\alpha)/(\mu_i \mu_r)$$

$$x = \frac{\mu_i \mu_r}{\mu_i + \mu_r}$$

$$p = (1 + c\cos^2\psi)/(1 + c\overline{\cos^2\psi})$$

$$\cos\psi = \sin\theta_i \sin\theta_r \cos\phi - \cos\theta_i \cos\theta s_r$$

式中，a, b, c 和 α 是参数，$\overline{\cos^2\psi}$ 是 $\cos^2\psi$ 对相对方位角的平均值。

(4) Li 提出的稀疏冠层的 BRDF 模型：

在这个模型中利用高度为 $2b$，宽度为 $2a$，中心在地面上方 h 处的回转椭球体来对树进行理想化描述，BRDF 方程为：

$$r = c_0 + c_1 k(\theta_i, \theta_r, \phi; b/a, h/b)$$

式中，c_0 和 c_1 是线性参数，而 k 是函数核。

岩石的热模型

崔承禹，肖青，支毅乔等：岩石的热模型分析，遥感学报，1998, 2(1)

(1) 克兰克-尼克森公式：

$$-ru_{i-1}^{j+1} + (2+2r)u_i^{j+1} - ru_{i+1}^{j+1} = ru_{i-1}^{j} + (2-2r)u_i^{j} + ru_{i+1}^{j}$$

$$r = \frac{k\Delta t}{\rho C(\Delta x)^2}$$

式中，i 代表位置；j 代表时间；r 为比例因子；u 为岩石表面绝对温度；p 为岩石密度；C 为比热容；k 为热传导率；x 为岩石内距表面深度；t 为时间。

(2) 上边界模型：

$$\left(\frac{2.0}{r} + 2.0 - \frac{2a\sqrt{\Delta t}}{P\sqrt{r}}\right)u_1^{j+1} - 2u_2^{j+1} = \left(\frac{2.0}{r} - 2.0 + \frac{2a\sqrt{\Delta t}}{P\sqrt{r}}\right)u_1^{j} + 2u_2^{j} - \frac{4c\sqrt{\Delta t}}{P\sqrt{r}}$$

$$a = 4\varepsilon\sigma T_{sky}^3$$

$$c = 4\varepsilon\sigma T_{sky}^3 - (1-A)S_0 LH(t) + Q$$

$$H(t) = \begin{cases} m(z)\cos z' & (t_R < t < t_s) \\ 0 & (t_s < t < t_R + \tau) \end{cases}$$

式中，P 为热惯量；Q 为地表径向地热热流通量；S_0

为太阳常数；L 为云层影响因子；A 为地面反照率；ε 为辐射系数；σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数；T_{sky} 为等效空气温度；$m(z)$ 为大气透过率，是天顶角 z 的函数；z' 为由于地面坡度形成的区域天顶角；t_R 和 t_s 分别为太阳升起和落下的时间。

(3) 下边界模型：

$$u = T_0$$

式中，T_0 随岩石的不同而略有差异。

农田 T_B 及其指数的辐射传输模拟模型

金亚秋：星载微波 SSM/I 遥感在中国东北华北农田的辐射特征分析. 遥感学报，1998，2(1)

辐射亮度温度 $T_{vp}(\theta)$ 模型：

$$T_{vp}(\theta) = e_{vp}(\theta)T_S e^{-\tau_v} + T_a(1-e^{-\tau_v})(1+r_{vp}e^{-\tau_v})$$

$$r_{vp} = 1 - e_{vp}$$

式中，下标 v 表示频率；p 表示极化(V,H)；T_S 和 T_a 分别为地面和大气的物理温度；τ_v 为大气不透明度；e_{vp} 为 vGHz 的地面 p 极化热发射率；r_{vp} 地面 p 极化反射率。

海洋水色遥感信息特征量的分析模型

潘德炉，李淑菁：卫星海洋水色遥感信息特征量的研究. 遥感学报，1998，2(1)

(1) 到达卫星水色扫描仪的辐射率模型：

$$L_t(\lambda) = L_r(\lambda) + L_a(\lambda) + L_{sr}(\lambda) + L_W(\lambda) + L_b(\lambda)$$

式中，$L_t(\lambda)$ 为水色扫描仪接收到的总辐射率；$L_r(\lambda)$ 和 $L_a(\lambda)$ 分别为来自大气的瑞利散射和气溶胶散射的辐射率；$L_{sr}(\lambda)$ 为来自海面太阳反射光的辐射率；$L_W(\lambda)$ 和 $L_b(\lambda)$ 分别为来自水面出射和水体底部反射的辐射率。

(2) 水色信息的特征量——辐射信噪比 S_{NR} 模型：

$$S_{NR} = \frac{L_W(\lambda)}{L_t(\lambda) - L_W(\lambda)}$$

BRDF 模型

李小文：BRDF 大气影响订正环的收敛性研究. 遥感学报，1998，2(1)

(1) 考虑地表 BRDF 的大气订正模型：

$$\rho_{toa} = \rho_{dd}^{-} + \frac{T_- I T_+ \cdot r}{1 - \rho_{ff}^{+} \cdot r}$$

$$r = \frac{\rho_{toa} - \rho_{dd}^{-}}{\rho_{ff}^{+}(\rho_{toa} - \rho_{dd}^{-}) + T_- T_+}$$

式中，ρ_{toa} 为传输器在大气顶部观察到的反射率；ρ_{dd}^{-} 为阳光进入大气顶部后，向传输器方向的路径散射发射率；ρ_{ff}^{+} 为地表散射光向上遭遇大气的路径反射；T_- 和 T_+ 分别为大气的向下和向上传输矩阵；I 为 2×2 单元矩阵；r 为朗伯假定反射率。

(2) 朗伯假定下大气纠正的误差分析模型：

大气订正模型：

$$\rho_{toa} - \rho_{dd}^{-} = \frac{R_{dd} \cdot T_- \cdot I \cdot T_+ - T_- \Delta R \cdot T_+}{1 - \rho_{ff}^{+} \cdot (R_{dd} - \Delta R_{ff})}$$

$$R_{dd} = \frac{(\rho_{toa} - \rho_{dd}^{-})(1 + \rho_{ff}^{+}\Delta R_{ff}) + T_- \Delta R \cdot T_+}{\rho_{ff}^{+}(\rho_{toa} - \rho_{dd}^{-}) + T_- \cdot I \cdot T_+}$$

$$\Delta R = \begin{bmatrix} 0 & \Delta R_{df} \\ \Delta R_{fd} & \Delta R_{ff} \end{bmatrix}$$

$$\Delta R_{fd} = R_{dd} - R_{fd}$$

$$\Delta R_{df} = R_{dd} - R_{df}$$

$$\Delta R_{ff} = R_{dd} - R_{ff}$$

式中，R_{dd} 为二项性反射；R_{ff} 为地表的半径反射率(扇入扇出)；下标 df 和 fd 分别表示直入扇出(方向—半球)和扇入直出(半球—方向)；其他同上。

误差 ε_r^0 模型：

$$\varepsilon_r^0 = R_{dd} - r = \frac{(\rho_{toa} - \rho_{dd}^{-}) \cdot \rho_{ff}^{+} \cdot \Delta R_{ff} + T_- \Delta R \cdot T_+}{\rho_{ff}^{+}(\rho_{toa} - \rho_{dd}^{-}) + T_- \cdot I \cdot T_+} \approx \Delta R_{ff}\left[1 - \frac{t_{dd}^{-} \cdot t_{dd}^{+}}{\rho_{ff}^{+}(\rho_{toa} - \rho_{dd}^{-}) + T_- \cdot I \cdot T_+}\right]$$

式中，t_{dd}^{-} 为阳光直射穿透大气层的传输率；t_{dd}^{+} 为地表反射穿透大气层到达传感器的传输率；其他同上。

(3) BRDF 订正环的收敛性模型：

$$\varepsilon_r^1 \approx \varepsilon_r^0\left[1 - \frac{t_{od}^{-} \cdot t_{dd}^{+}}{K_{ff}^1 \rho_{ff}^{+}(\rho_{toa} - \rho_{dd}^{-}) + T_- \cdot K^1 \cdot T_-}\right]$$

$$K^1 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{R_{df}^1}{R_{dd}^1} \\ \frac{R_{fd}^1}{R_{dd}^1} & \frac{R_{ff}^1}{R_{dd}^1} \end{bmatrix}$$

$$K_{ff}^1 = K^1(2,2)$$

多源遥感影像融合的相关模型

孙家柄，刘继琳，李军：多源遥感影像融合．遥感学报，1998，2(1)

1. 基于像元的影像加权融合

(1) 加权融合过程模型：

$$I'_{ij} = A(P_i I_i + P_j I_j) + B$$

(2) 相关系数 r_{ij} 模型：

$$r_{ij} = \frac{\frac{1}{mn}\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{n}(I_{ikl} - \bar{I}_i)(I_{jkl} - \bar{I}_j)}{\sqrt{\frac{1}{mn}\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{n}(I_{ikl} - \bar{I}_i)^2 \frac{1}{mn}\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{n}(I_{jkl} - \bar{I}_j)^2}}$$

2. 基于小波理论的影像融合

(1) 子带融合值 $W^k(2^j,x,y)$ 模型：

$$W^k(2^j,x,y) = \begin{cases} W_A^k(2^j,x,y) & (D_A^k(2^j,x,y) > D_B^k(2^j,x,y)) \\ W_B^k(2^j,x,y) & (\text{其他}) \end{cases}$$

式中，$W_A^k(2^j,x,y)$，$W_B^k(2^j,x,y)$ 分别为带融合影像 A,B 的子带数据；$D_A^k(2^j,x,y)$ 和 $D_B^k(2^j,x,y)$ 分别为以 (x,y) 为中心像元邻区窗口方差；j 为分层号；k=1,2,3,…,k，为待融合的不同波段影像。

(2) 基带融合值 $A(2^j,x,y)$ 模型：

$$A(2^j,x,y) = K_1 A_A(2^j,x,y) + K_2 A_B(2^j,x,y)$$

式中，$A_A(2^j,x,y)$ 和 $A_B(2^j,x,y)$ 分别为最低分辨率层待融合影像 A,B 的基带数据；K_1 和 K_2 为权系数。

3. 基于类别的影像融合

(1) 分类——后验概率 $P(\omega_i/x)$ 和风险 $r_j(x)$ 模型：

$$P(\omega_i/x) = \frac{P(x/\omega_i)P(\omega_i)}{P(x)}$$

$$i = 1,2,\cdots,m$$

$$r_j(x) = \frac{1}{P(x)}\sum_{i=1}^{m} L_{ij} P(x/\omega_i)\cdot P(\omega_i)$$

式中，L_{ij} 为分类损失。

(2) 特征选择——散布矩阵模型：

$$S_w = S_u + S_b$$

$$S_u = \sum_{i=1}^{m} P(\omega_i)\Sigma_i$$

$$S_b = \sum_{i=1}^{m} P(\omega_i)(M_i - M_0)(M_i - M_0)^T$$

式中，S_w 为各细类混合分布的散布矩阵，越大越好；S_u 为类内散布矩阵，越小越好；S_b 为类间散布矩阵，越大越好；m 为细类总数；$P(\omega_i)$ 为 ω_i 类的先验概率；Σ_i 为 ω_i 类的协方差矩阵；M_0 为各细类混合分布的数学期望；M_i 为 ω_i 类的数学期望。

4. 融合影像评价

(1) 信息量——各单色影像的熵的模型：

$$f_{ent} = -\sum_{0}^{255} P(i)\lg(P(i))$$

(2) 清晰度——融合前后影像的梯度模型：

$$\bar{g} = \frac{1}{(M-1)(N-1)}\sum\sqrt{(\Delta I_x^2 + \Delta I_y^2)/2}$$

匹配滤波结合 Chirp Scaling 算法

肖永新，李侍荣：一种匹配滤波结合 Chirp Scaling SAR 数字成像处理方法。遥感学报 1998，2(1)

1. Chirp Scaling 算法

(1) 第 1 相位函数模型：

$$S_1(\tau, f_a; r_{ref}) = \exp\left\{j\pi K_s(f_a, r_{ref}) \times C_s(f_a)[\tau - \tau_{ref}(f_a)]^2\right\}$$

$$C_s(f_a) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left[\frac{\lambda f_a}{2V(r)}\right]^2}} - 1$$

$$\frac{1}{K_s(f_a, r)} = \frac{1}{K} - r\alpha(f_a, r)$$

$$\alpha(f_a, r) = \frac{\frac{2\lambda}{c^2}\left[\frac{\lambda f_a}{2V(r)}\right]}{\left[1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2V(r)}\right)^2\right]^{3/2}}$$

$$\tau_{ref}(f_a) = \frac{2}{c} r_{ref}[1 + C_s(f_a)]$$

式中，f_a 为方位频率；τ 为距离时间；λ 为雷达波长；c 为光速；r 为传感器与目标最近距离；r_{ref} 为参考距离；$\tau_{ref}(f_a)$ 为参考距离对应的时间；$K_s(f_a, r)$ 为有效

线性调频率；$C_s(f_a)$ 为弯曲因素。

(2) 第 2 相位函数模型：

$$S_2(f_r, f_a; r) = \exp\left\{ j\pi \frac{f_r^2}{K_s(f_a, r_{ref})[1 + C_s(f_a)]} - j\frac{4\pi}{c} f_r r_{ref} C_s(f_a) \right\}$$

式中，f_r 为距离频率。

(3) 第 3 相位函数模型：

$$S_3(\tau, f_a) = \exp\left\{ j\frac{2\pi}{\lambda} c\tau \left[1 - \left[1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2V(r = \tau c/2)} \right)^2 \right]^{1/2} \right] - j\frac{4\pi}{c^2} K_s(f_a, r_{ref})[1 + C_s(f_a)] \times C_s(f_a)\left(\frac{c\tau}{2} - r_{ref} \right)^2 \right\}$$

2. 匹配滤波结合 Chirp Scaling 算法

(1) 第 1 相位函数模型与 Chirp Scaling 算法中的第 1 相位函数模型相同。

(2) 第 2 相位函数模型：

$$\Phi_2(f_r, f_a; r) = \exp\left[-j\frac{4\pi}{c} f_r r_{ref} C_s(f_a) \right]$$

(3) 第 3 相位函数模型：

$$\Phi_3(\tau, f_a) = \exp\left\{ -j\frac{4\pi}{c^2} K_s(f_a, r_{ref})[1 + C_s(f_a)] \times C_s(f_a)\left(\frac{c\tau}{2} - r_{ref} \right)^2 \right\}$$

IHS 变换复合方法及其像质评价标准

贾永红，李德仁，孙家柄等：四种 IHS 变换用于 SAR 与 TM 影像复合的比较．遥感学报，1998，2(2)

1. 四种典型的 IHS 变换式

(1) 球体变换模型：

$$I = \frac{1}{2}(M + m)$$

$$S = \frac{M - m}{2 - M - m}$$

$$H = 60(2 + b - g) \quad (r = M)$$

$$H = 60(4 + r - b) \quad (g = M)$$

$$H = 60(6 + g - r) \quad (b = M)$$

式中，$r = \frac{\max - R}{\max - \min}$；$g = \frac{\max - G}{\max - \min}$；$b = \frac{\max - B}{\max - \min}$；$\max = \max[R, G, B]$；$\min = \min[R, G, B]$；$M = \max[r, g, b]$；$m = \min[r, g, b]$。

(2) 圆柱体变换模型：

$$I = \frac{1}{\sqrt{3}}(R + G + B)$$

$$H = \tan^{-1}\left[\frac{2R - G - B}{\sqrt{3}(G - B)} \right] + C$$

$$S = \frac{\sqrt{6}}{3}\sqrt{R^2 + G^2 + B^2 - RG - RB - GB}$$

式中，$\begin{cases} C = 0 & (G > B) \\ C = \pi & (G < B) \end{cases}$

(3) 三角形变换模型：

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B)$$

$$H = \frac{G - B}{3(I - B)} \quad S = 1 - \frac{B}{I} \quad (B = \min)$$

$$H = \frac{B - R}{3(I - R)} \quad S = 1 - \frac{R}{I} \quad (R = \min)$$

$$H = \frac{R - G}{3(I - G)} \quad S = 1 - \frac{G}{I} \quad (G = \min)$$

式中，$\min = \min[R, G, B]$。

(4) 单六角锥变换模型：

$$S = \frac{\max - \min}{\max}$$

$$I = \max$$

$$H = \frac{5 + \frac{R - B}{R - G}}{6} \quad (R = \max,\ G = \min)$$

$$H = \frac{1 - \frac{R - G}{R - B}}{6} \quad (R = \max,\ B = \min)$$

$$H = \frac{1 + \frac{G - R}{G - B}}{6} \quad (G = \max,\ B = \min)$$

$$H = \frac{3 - \frac{G - B}{G - R}}{6} \quad (G = \max,\ R = \min)$$

$$H = \frac{3 + \frac{B - G}{B - R}}{6} \quad (B = \max,\ R = \min)$$

$$H = \frac{5 - \frac{B - R}{B - G}}{6} \quad (B = \max,\ G = \min)$$

式中，$\max=\max[R,G,B]$；$\min=\min[R,G,B]$。

2. 像质评价标准

(1) 熵与联合熵的模型：

熵：

$$H(x)=-\sum_{i=0}^{255}P_i\log_2 P_i$$

联合熵：

$$H(x_1,x_2)=-\sum_{i_1,i_2=0}^{255}P_{i_1i_2}\log_2 P_{i_1i_2}$$

$$H(x_1,x_2,x_3)=-\sum_{i_1,i_2,i_3=0}^{255}P_{i_1i_2i_3}\log_2 P_{i_1i_2i_3}$$

$$H(x_1,x_2,x_3,x_4)=-\sum_{i_1,i_2,i_3,i_4=0}^{255}P_{i_1i_2i_3i_4}\log_2 P_{i_1i_2i_3i_4}$$

式中，P_i为图像像素灰度值为i的概率；$P_{i_1i_2}$为图像x_1中像素灰度为i_1与图像x_2中同名像素灰度为i_2时的联合概率；$P_{i_1i_2i_3}$，$P_{i_1i_2i_3i_4}$亦类推。

(2) 平均梯度模型：

$$g=\frac{1}{(M-1)(N-1)}\times\sum_{i=1}^{(M-1)(N-1)}\sqrt{\frac{1}{2}\left[\left(\frac{\Delta D_x}{\Delta x}\right)^2+\left(\frac{\Delta D_y}{\Delta x}\right)^2\right]}$$

式中，g为平均梯度，g越大，表明图像越清晰。

简化的 IEM 模型

王翠珍，郭华东：利用 SIR-C 极化数据提取地面参数。遥感学报，1998，2(2)

$$\sigma_{PP}=|\alpha_{PP}|^2\frac{S_r}{a_{PP}(\theta_i)+b_{PP}(\theta_i)S_r}$$

式中，θ为入射角；PP为极化状态；α为只依赖于入射角和介电常数的变量；a和b为常数，由统计分析获得；S_r为仅与散射高度s有关的地面粗糙度参数。

Lee 的滤波算法模型

庞晓红，王贞松：SAR 图像保留边缘多窗口相干斑滤除方法。遥感学报，1998，2(4)

$$\hat{x}=\bar{x}+k(z-\bar{x})$$

$$k=\frac{Var(x)}{\bar{x}^2\sigma_v^2+Var(x)}$$

式中，$\bar{x}$为x的局部均值；$Var(x)$为x的局部方差；σ_v^2为方差；z为像素灰度值。

大气水汽和气溶胶对获取地表温度影响的计算模型

闵祥军，朱启疆，田庆久：敦煌地区大气水汽和气溶胶对获取地表温度的影响　遥感学报，1998，2(4)

(1) 辐射温度模型：

$$T^*(K)=\frac{K_2}{\ln(K_1/L_\lambda+1)}$$

式中，$T^*(K)$为卫星传感器高度未订正的辐射温度；L_λ为辐射度。

(2) 总辐射度L_λ模型：

$$L_\lambda=(\varepsilon_\lambda L_{g\lambda}+R_\lambda L_{\downarrow\lambda})\tau_\lambda+L_{\uparrow\lambda}$$

式中，L_λ为热红外波段卫星传感器测量到的总辐射度；ε_λ为地面目标比辐射率；$L_{g\lambda}$为地表出射辐射度；R_λ为地面目标反射率；$L_{\downarrow\lambda}$为大气向下辐射度；τ_λ为地面-传感器之间大气透过率；$L_{\uparrow\lambda}$为大气向上辐射度。

土壤水分含量的遥感估测模型

Wagner W, Lemoine G, Rott H：根据 ERS 散射仪及土壤数据估计土壤水分的方法　Remote Sensing of Environment, 1999, 70

(1) 土壤水分场的空间及时间的自相关函数ρ可表示为：

$$\rho(\zeta)=\eta e^{\zeta/Z_s}+(1-\eta)e^{\zeta/Z_a}$$

$$\eta=\frac{\sigma_s^2}{\sigma_s^2+\sigma_a^2}$$

式中，ζ是距离或时间差；Z_s是土地表面相关变化的标度；Z_a是大气胁迫相关变化的标度；σ_s^2是土地表面相关变化的方差；σ_a^2是大气胁迫相关变化的方差。

(2) 土壤水分含量[$m_s(t)$]可通过下式估计：

$$m_s(t)=\frac{\sigma^0(40,t)-\sigma_{dry}^0(40,t)}{\sigma_{wet}^0(40,t)-\sigma_{dry}^0(40,t)}$$

式中，$\sigma^0(40,t)$是外推到40°参考角度的后向散射系数；$\sigma_{wet}^0(40,t)$和$\sigma_{dry}^0(40,t)$分别是$\sigma^0(40,t)$的最大值和最小值，分别相应于土壤表层干燥及饱和湿润的情形；t是时间。

(3) 土壤水分指数I_{sw}定义为：

$$I_{sw}(t)=\frac{\sum_i m_s(t_i)e^{-(t-t_i)/T}}{\sum_i e^{(t-t_i)/T}} \qquad (t_i < t)$$

土壤水分 W 相应于时间 t 的变化曲线可根据 I_{sw} 估计：

$$W(t)=W_{min}+I_{sw}(t)\cdot(W_{max}-W_{min})$$

式中，W_{max} 和 W_{min} 分别是 W 的最大值和最小值。

(4) 植物可获水分 W_{pa} 可表示为：

$$W_{pa}(t)=I_{sw}(t)\left(\frac{C_f+C_{tw}}{2}-L_w\right)$$

式中，L_w 是枯萎值，C_f 是土地的容量，C_{tw} 是总的水分容量。

木本和草本植被覆盖度估算模型

Roderick M L, Noble I R, Cridland S W：从时间序列的卫星观测数据中估算木本和草本植被覆盖度。Global Ecology and Biogeography, 1999, 8

(1) 光合作用活动辐射(F_{PAR})：

$$F=V[(F_{max}-F_{min})/(V_{max}-V_{min})]+F_{min}$$

式中，F 是 F_{PAR}，V 是 I_{ndv}。

(2) F 的最终时间序列是常绿(F_e)和 raingreen (F_r)成分的总和：

$$F(t)=F_e(t)+F_r(t)$$

式中，t 是时间。

(3) $F(t)$ 可以表示为由趋势(T)、季节性(S)和随机(R) 成分组成的时间序列：

$$F(t)=T(t)+S(t)+R(t)$$

第二代一般全球生产力效率模型(GLO-PEM2)

Goetz S J, Prince S D, Goward S N et al：初级生产力的卫星遥感：一个改进的生产力效率模型。Ecological Modelling, 1999, 122

(1) 表面辐射温度：

$$T_s=1.274+(\frac{e'}{2})T_4+(\frac{e''}{2})T_5$$

式中，T_4、T_5 是 AVHRR4，5 通道的亮度温度；e' 和 e'' 是表征在不同通道的不同的 e 的特征值，e 的计算式为 $e=(\frac{1-e*}{0.6})I_{ndv}+\left\{e*-\left[\frac{0.05(1-e*)}{0.6}\right]\right\}$，$e*$ 是 CERES 地图的发射率(map emissivity)，I_{ndv} 是标准植被差异指数(normalized difference vegetation index)。

(2) 周围环境温度：

$$T_a=a\cdot I_{ndv\,max}+b$$

式中，I_{ndvmax} 取特定值(0.7~0.9)；a 和 b 是对滑动的窗口进行最小方差回归分析所得系数。

(3) 水蒸气压力差额(vapor pressure deficit)：

$$D=0.611\times\exp\left(17.27\times\frac{T_a}{T_a+237}\right)-\exp\left(17.27\times\frac{T_d}{T_d+237}\right)$$

式中，$T_d=\frac{\ln(\lambda+1)+\ln(U)-0.1133}{0.0393}$，$\lambda$ 是纬度和季节调整参数，$U=17.32\times\frac{\Delta T-0.6831}{T_s-291.97}+0.5456$；$I_{cs}$ 是积累表面湿度指数。

(4) 日吸收可用于光合作用的辐射：

$$APAR_t=F_{par}\times PAR_t$$

式中，PAR_t 是日入射可用于光合作用的辐射，$F_{par}=1.67\times I_{ndv}-0.08$。

(5) 地面生物量：

$$W=7166.1(\rho_{min}^{-2.6})$$

式中，ρ_{min} 是年最小可见光通道反射率。

(6) 总初级生产力：

$$GPP=APAR\cdot\varepsilon_g$$

式中，$\varepsilon_g=f(T_a,D,I_{cs})\cdot\varepsilon_g^*$，$\varepsilon_g^*=55.2\alpha$。

(7) 自养呼吸：

$$R_a=\left[0.53\times\left(\frac{W}{W+50}\right)\right]\cdot e^{0.5\left(\frac{T_c-T_a}{25}\right)}$$

式中，T_c 是空气的长期气候平均温度气候。

(8) 总初级净第一生产力：

$$NPP=GPP-R_a$$

地表粗糙度影响的消除模型

Goyal S K, Seyfried M S, O'Neill P E：地表粗糙度及地形对山区牧场的空载 SAR 数据的影响的校正。Remote Sensing of Environment, 1999, 67

地表粗糙度对 SAR 后向散射系数 σ^0 的影响的定

糙化可通过从下面 Dubois 等(1995)提出的方程中消去 ε 得到：

$$\sigma_{HH}^0 = 10^{-2.75}\frac{\cos^{1.5}\theta}{\sin^5\theta}\times 10^{0.028\varepsilon\tan\theta}(kh\sin\theta)^{1.4}\lambda^{0.7}$$

$$\sigma_{VV}^0 = 10^{-2.35}\frac{\cos^3\theta}{\sin^3\theta}\times 10^{0.046\varepsilon\tan\theta}(kh\sin\theta)^{1.1}\lambda^{0.7}$$

式中，θ 是入射角；k 是波数；λ 是波长；而 σ_{HH}^0 和 σ_{VV}^0 是 SAR σ^0 的极化量；h 是表示地表粗糙度的变量。

稀疏植被的 NDVI-T$_s$ 关系及蒸腾率的估算模型

Boegh E, Soegaard H, Hanan N et al：基于高解析度的卫星数据对 Sahel 地区的稀疏植被的 NDVI-T_s 关系及蒸腾的遥感研究. Remote Sensing of Environment. 1999, 69

(1) 当 *NDVI* 被认为是植被覆盖比例(f_v)的指示器时，*NDVI* - T_s 之间的关系可利用与植被温度间的隐含的信息进行估计。T_s 表示土壤(T_{soil})与植被的复合温度，通常可表示为一种简单的相加关系：

$$T_s = f_v T_v + (1-f_v)T_{soil}$$

式中，T_v 可通过将 I_{ndv} - T_s 的回归曲线外推到茂密植被处而得到。

(2) 通过在地表植被成分处应用能量平衡方法，稀疏植物的瞬时蒸腾率(λ_{E_v})可估计为：

$$\lambda_{E_v} = R_n^v - H_v$$

式中，R_n^v 是植被吸收的净辐射；H_v 是冠层内叶片与空气间的显热通量。

(3) 陆地面积的蒸腾率(λE_v)可估计为：

$$\lambda_{E_v} = \lambda I_{la}\frac{Q_s}{l}$$

式中，Q_s 是树的汁液流量(kg·s^{-1})；l 是叶面积；I_{la} 是叶面积指数。

(4) 所有的表面温度数据都与长波辐射的测量值($R_l\uparrow$)有以下关系：

$$R_l\uparrow = \varepsilon_s\sigma T_s^x + (1-\varepsilon_s)\varepsilon_a\sigma T_a^x$$

式中，ε_s 是稀疏植被的发射系数；ε_a 是大气发射系数；σ 是 Stefan Boltzmann 常数；σT^x 则通过对分布函数对相应波长进行积分而求得。

(5) R_n^v 可利用 Beer 定律关系进行计算，对光线的方向进行了校正可以用下式进行：

$$R_n^v = R_n(1-e^{K_{LAI}/\cos\theta_s})$$

式中，R_n 是在冠层上方测量的净辐射；K 是净辐射在冠层内的消光系数。

(6) H_v 可利用两天的叶片温度进行计算：

$$H_v = C_a g_b(T_v - T_0)$$

式中，T_v 表示平均叶片温度；C_a 是空气的热容量；g_b 是体积叶片边界导率。

$$T_0 = T_a + \frac{H\cdot r_a}{C_a}$$

式中，r_a 是大气阻率，利用 Shuttleworth 和 Gurney (1990)针对稀疏植被提出的模型计算；H 是冠层的显热通量。

(7) 10.00 h 的蒸腾率最后可表示为：

$$\lambda E_v = (aI_{ndv}+b)\times(R_s\downarrow(1-\overline{\rho_s})+\varepsilon_s R_l\downarrow-\varepsilon_s\sigma T_s^x) - C_a g_b\{T_v - [T_s - a(T_s - T_a)]\}$$

式中，$R_s\downarrow$ 是入射的太阳辐射；$\overline{\rho_s}$ 是球形辐射的半球面反射系数。

(8) 贡献给植被的净辐射比例为：

$$fR_n = 1.8616 I_{ndv} - 0.219 \qquad (r=0.80)$$

较大像元的 I_{la} 的计算模型

Chen J M：通过结构得到的遥感表面参数的空间尺度性. Remote Sensing of Environment. 1999, 69

得到一个较大的像元(例如，AVHRR 1km 像元)的 I_{la}(记为 $\overline{L}$)的正确方法是：将其分成 n 个小像元的组合，计算每个小像元的 I_{la} 值，记为 L_i，然后对所有的小像元进行求和计算：

$$\overline{L} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}L_i\text{。}$$

如果，$L_i = f_s(I_{v_i})$，I_{v_i} 是像元 i 的植被指数，则：

$$\overline{L} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}f_s(I_{v_i})$$

当 $f_s(I_{v_i})$ 近似为线性时，$\overline{L}\approx f_s(\overline{I_v})$，$\overline{I_v} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}I_{v_i}$；

当 $f_s(I_{v_i})$ 为非线性时，$f_s(\overline{I_v}) \neq \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}f_s(I_{v_i})$。

大气吸收的校正模型

Ouaidrari H. Vermote E F：Landsat TM 数据的大气校正计算. Remote Sensing of Environment 1999, 70

（1）如果假设目标是朗伯的，且均匀的，而且大气吸收和粒子散射可被简单地解耦，则表面反射系数（ρ_s）可写为：

$$\rho_s = \frac{\rho_{int}}{1 + S_{R+A} \cdot \rho_{int}}$$

式中，$\rho_{int} = \frac{(C_{slope}DC - C_{offset})\pi d^2 / E_s}{\mu_s Tg_{O_3} Tg_{O_2} \times Tg_{H_2O} T_{R+A}} - \frac{\rho_{R+A}}{Tg_{H_2O} T_{R+A}}$；$S$ 是 Rayleigh 和气溶胶漫反射；C_{slope} 和 C_{offset} 是将 DC 转换为传感器辐射的校准系数；DC 是 TM 数字计数；E_s 是 TM 波段上的太阳辐射；d 是地球与太阳间的距离；ρ_{R+A} 是大气本身反射率；(Rayleigh 和气溶胶)；Tg_{O_2} 是氧气吸收透射率；Tg_{O_3} 是臭氧吸收透射率；Tg_{H_2O} 是和气溶胶散射透射率；$\mu_s = 1/\cos(\theta_s)$；θ_s 是太阳天顶角。

（2）气体吸收透射可表示为：

$$Tg_{H_2O}(U_{H_2O}, \theta_s, \theta_v) = e^{-e[a + b\ln(mU_{H_2O}) + c\ln(mU_{H_2O})^2]}$$

$$Tg_{O_3}(U_{O_3}, \theta_s, \theta_v) = e^{-a(mU_{O_3})}$$

$$Tg_{O_2CO_2NO_2CH_4}(P, \theta_s, \theta_v) = \prod_{g=O_2CO_2,NO_2CH_4} \frac{1}{1 + a_g (m^{P/P_0})^{b_g}}$$

式中，θ_v 是视顶角；U_{H_2O} 是水蒸气的浓度；U_{O_3} 是臭氧的浓度；P 是表面压。

$$m = \frac{1}{\cos\theta_s} + \frac{1}{\cos\theta_v}$$

式中，系数 a、b 和 c 依赖于波长和气体吸收。

散射模型

汤广东，田国良：棉田微波散射研究. 遥感学报，1999，3(1)

（1）冠层叶片的散射——圆盘的散射振幅模型：

$$f_{VV}(s,i) = \frac{k^2 v_0}{4\pi}(\varepsilon_s - 1) \times \{a_T[\cos\theta_s \cos\theta_i \cos(\phi_s - \phi_i) + \sin\theta_s \sin\theta_i + (a_N - a_T)](-\cos\theta_s \cos\phi_s \cos\gamma \sin\beta + \cos\theta_s \sin\phi_s \sin\gamma \sin\beta - \sin\theta_s \cos\beta) \times (-\cos\theta_i \cos\phi_i \cos\gamma \sin\beta + \cos\theta_i \sin\phi_i \sin\gamma \sin\beta - \sin\theta_i \cos\beta)\}$$

$$f_{VH}(s,i) = \frac{k^2 v_0}{4\pi}(\varepsilon_s - 1) \times [a_T(-\cos\theta_s \cos\phi_s \sin\phi_i + \cos\theta_s \sin\phi_i \cos\phi_i) + (a_N - a_T)(-\cos\theta_s \cos\phi_s \cos\gamma \sin\beta + \cos\theta_s \sin\phi_s \sin\gamma \sin\beta - \sin\theta_s \cos\beta) \times (\sin\phi_i \cos\gamma \sin\beta + \cos\phi_i \sin\gamma \sin\beta)]$$

$$f_{HV}(s,i) = \frac{k^2 v_0}{4\pi}(\varepsilon_s - 1) \times [a_T(-\cos\theta_i \cos\phi_i \sin\phi_s + \cos\theta_i \sin\phi_i \cos\phi_s) + (a_N - a_T)(-\cos\theta_i \cos\phi_i \cos\gamma \sin\beta + \cos\theta_i \sin\phi_i \sin\gamma \sin\beta - \sin\theta_i \cos\beta) \times (\sin\phi_s \cos\gamma \sin\beta + \cos\phi_s \sin\gamma \sin\beta)]$$

$$f_{HH}(s,i) = \frac{k^2 v_0}{4\pi}(\varepsilon_s - 1) \times [a_T \cos(\phi_s - \phi_i) + (a_N - a_T)(\sin\phi_s \cos\gamma \sin\beta + \cos\theta_s \sin\gamma \sin\beta) \times (\sin\phi_i \cos\gamma \sin\beta + \cos\phi_i \sin\gamma \sin\beta)]$$

对于后向散射有：$\phi_s = \phi_i = 0$，$\theta_s = \theta_i$；对于前向散射有：$\phi_i = 0$，$\phi_s = \pi$，$\theta_s = \pi - \theta_i$；式中，下标 s，i 分别代表散射和入射；$a_T$ 和 a_N 均为极化张量分量。

（2）棉田的散射模型：

VRT 方程：

$$\cos\theta \frac{d}{dz}\bar{I}(\theta,\phi,z) = -\kappa_e(\theta,\phi)\bar{I}(\theta,\phi,z) + \bar{S}(\theta,\phi,z) -$$

$$\cos\theta \frac{d}{dz}\bar{I}(\pi - \theta,\phi,z) = -\kappa_e(\theta,\phi)\bar{I}(\pi - \theta,\phi,z) + \overline{W}(\theta,\phi,z)$$

$$\bar{S}(\theta,\phi,z) = \int_0^{2\pi} d\phi' \int_0^{\pi/2} d\phi' \sin\theta' [\bar{P}(\theta,\phi,\theta',\phi') \times \bar{I}(\theta',\phi',z') + \bar{P}(\theta,\phi,\pi - \theta',\phi')\bar{I}(\pi - \theta',\phi',z')]$$

$$\overline{W}(\theta,\phi,z) = \int_0^{2\pi} d\phi' \int_0^{\pi/2} d\phi' \sin\theta' [\bar{P}(\pi - \theta,\phi,\theta',\phi') \times \bar{I}(\theta',\phi',z') - \bar{P}(\pi - \theta,\phi,\pi - \theta',\phi')\bar{I}(\pi - \theta',\phi',z')]$$

式中，κ_e 为消光系数；θ 为入射角；P 为散射相函数；I 为辐射强度。

快速近似主成分分析算法

朱述龙：快速近似主成分分析算法. 遥感学报，1999，3(1)

1. 小波包变换

（1）小波包分解模型：

$$S_{2n,l}^{j-1}=\sum_m h_{m-2l}S_{n,m}^j$$

$$S_{2n-1,l}^{j-1}=\sum_m g_{m-2l}S_{n,m}^j$$

(2) 小波包重构模型：

$$S_{n,k}^j=\sum_l p_{k-2l}S_{2n,l}^{j-1}+\sum_l q_{k-2l}S_{2n+1,l}^{j-1}$$

式中，$\{h_k\}$和$\{g_k\}$是与尺度函数和小波函数相对应的低通和高通滤波器 QMF 的系数；$(\{p_k\},\{q_k\})$ 是和$(\{h_k\},\{g_k\})$对应的 QMF 滤波器。

2. 快速近似主成分分析算法的变换矩阵的构造

最佳基的递归模型：

$$A_{k+1,n}=\begin{cases}A_{k,2n}\oplus A_{k,2n+1} & (M(A_{k,2n}x)+M(A_{k,2n+1}x)<M(B_{k+1,n}x))\\ B_{k+1,n} & (\text{其他})\end{cases}$$

式中，$B_{k,n}$为与信号集 X 对应的二叉树上第k层中第n个节点向对应的标准基，固定尺度参数k，对于所有的$0\leqslant n\leqslant 2^k$；$A_{k,n}$为从相对于$x\in span\{B_{k,n}\}$的小波库中挑选出的最好基。

信号的多尺度分析算法模型

李强，王正志：基于小波理论的遥感图像高保真压缩方法研究 遥感学报，1999，3(1)

$$S_m(n)=\sum_k h(k-2n)S_{m-1}(k)$$

$$C_m(n)=\sum_k g(k-2n)S_{m-1}(k)$$

式中，$h(n)$和$g(n)$分别为低通和高通滤波器；m为多尺度分解的层数；$S_m(n)$为$S_{m-1}(n)$在2^{-m}上的近似；$C_m(n)$为信号 S 从2^{-m+1}到2^{-m}的尺度近似时丢失的信息。

散射系数σ°模型

孙芳，罗贤云，尹志盈等：农作物后向散射特性的测量 遥感学报，1999，3(2)

$$\sigma^\circ=\frac{(4\pi)^3R^4L}{G_tG_r\lambda^2A}\cdot\frac{P_r}{P_t}$$

式中，R为散射计天线至目标的距离；P_r为散射计接收到的回波功率；P_t为散射计的发射功率；A为等效照射面积；G_t为发射天线的增益；G_r为接收天线的增益；L为系统损耗。

海水反射率$R(\lambda)$模型

曹文熙，钟其英，杨跃忠：南海水色遥感的主因子分析 遥感学报，1999，3(2)

$$R(\lambda)=0.33\frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda)}$$

$$a(\lambda)=a_w(\lambda)+ca_c(\lambda)+Xa_x(\lambda)+Ya_y(\lambda)$$

$$b_b(\lambda)=b_{bw}b_w(\lambda)+b_{bc}b_c(\lambda)+b_{bx}b_x(\lambda)+Ya_y(\lambda)$$

式中，c为以叶绿素为表征的浮游植物浓度；X为悬浮颗粒浓度，以其相应的散射系数表示；Y为黄色物质浓度，以其相应的吸收系数表示；a_w为纯水的吸收系数；a_c为浮游植物的比吸收系数；a_x为悬浮颗粒的比吸收系数；a_y为黄色物质的比吸收系数；b_w为海水的体散射系数；b_c为浮游植物的体散射系数；b_X为悬浮颗粒的体散射系数；b_{bc}、b_{bw}和b_{bx}分别为浮游植物、海水和悬浮颗粒的后向散射与总散射之比。

干涉雷达复图像配准方法分析模型

杨清友，王超：干涉雷达复图像配准与干涉纹图的增强 遥感学报，1999，3(2)

(1) 两个复数窗口的相关系数ρ模型：

$$\rho=\frac{\langle c_1\cdot c_2{}^*\rangle}{\left[\langle|c_1|^2\rangle\cdot\langle|c_2|^2\rangle\right]^{1/2}}$$

式中，c_1和c_2表示两幅图像；*表示复共振；$\langle\ \rangle$表示数学期望；ρ为复相关系数。

(2) 相位差图像的信噪比 SNR 模型：

$$SNR=\frac{f_{\max}}{\sum f_{i,j}-f_{\max}}$$

(3) 相位差图像的平均扰动函数模型：

$$f=\sum_i\sum_j\frac{\left|p_{(i+1,j)}-p_{(i,j)}\right|+\left|p_{(i,j+1)}-p_{(i,j)}\right|}{2}$$

式中，$p_{(i,j)}$为两幅图像在像元(i,j)处的相位差。

激光测距点分析与阴影分析模型

徐建忠，李树楷：基于激光测距的航空扫描影像中的建筑物的自动提取 遥感学报，1999，3(3)

(1) 测距点的三维坐标模型：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{1+\tan^2 p + \tan^2(r+\theta)}} \times \begin{bmatrix} \tan p \cos y - \tan(r+\theta)\sin y \\ \tan p \sin y + \tan(r+\theta)\cos y \\ -1 \end{bmatrix} [l] + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$$

式中，l 为激光测距数据(斜距)；θ 为激光束偏角；r 为飞机的横滚角；p 为俯仰角；y 为偏航角；X_0，Y_0 和 Z_0 为扫描中心点 WGS-84 坐标；X，Y 和 Z 为测距点的三维坐标。

(2) 灰度参考值 R 及域值 T 模型：

$$\begin{cases} R_{n+1} = b_n R_n + \eta_n x_n \\ T_{n+1} = d_n T_n + \xi_n x_n \end{cases}$$

式中，b_n，d_n，ξ_n 和 η_n 为权值，x 为灰度输入。

城乡断面上城市土地利用信息提取模型

章文波，方修琦，张兰生：利用遥感图像划分城乡过渡带方法的研究．遥感学报，1999，3(3)

1. 城市用地信息提取

概率模型：

$$p_i^{(k+1)}(X) = \frac{p_i^{(k)}(X)\sum_{r=1}^{4} p_i(X_r)}{\sum_j \left[p_j^{(k)}(X)\sum_{r=1}^{4} p_j(X_r) \right]}$$

式中，k 为迭代次数($k \geq 0$)；X_r 为中心像元 X 的邻域像元；r 为邻域像元编号($4 \geq r \geq 1$)；$p_i^{(k+1)}(X)$ 为迭代第 k 次后像元 X 属于 i 类的概率。

2. 城市用地比率的平滑处理

滑动比率窗口计算模型：

$$D(i,j) = \frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} g(i,j)}{N \times N}$$

式中，N 为统计窗口大小；$g(i,j)$ 为城市用地分布图上某像元的灰度值；i 和 j 为相应的行、列数；若该像元为城市用地，则 $g(i,j)=1$，否则 $g(i,j)=0$。

相近指数

田青：基于 GOODALL 相近指数的遥感图像和其他空间数据综合分类方法．遥感学报，1999，3(3)

(1) 相近指数 p_{ij} 模型：

$$p_{ij} = \frac{\sum_{k \in S} m_{ik}}{\sum_{k=1}^{r_i} m_{ik}}$$

$$S = \{k: A_{ik} > A_{ij}\}$$

式中，A_{ij} 表示第 i 个属性(共有 r_i 个不同值)上，具有值 j 的个体在第 i 个属性上与某个特定类的相近程度；A_{ik} 表示第 i 个属性上，具有值 k 的个体在第 i 个属性上与某个特定点的相近程度；m_{ij} 表示将要分类的集合中第 i 个属性具有值 j 的个体数目；s 为所有比值 j 在第 i 个属性上与该类更相近的值的集合。

(2) 综合相近指数 p_k 模型：

$$p_k = -2\sum_{i=1}^{a} \ln p_{ij}$$

式中，a 为属性的个数。

景观的异质性分析方法

曾辉，邵楠，郭庆华：珠江三角洲东部常平地区景观异质性研究．地理学报，1999，54(3)

(1) 信息熵法：

$$I = n/(N-1)$$

式中，I 为异质性信息熵；n 表示观察到的异质性次数；N 表示样段数。

(2) 空隙度指数法：

$$Z^{(1)} = \sum S(n(s,r)/N(r))$$

$$Z^{(2)} = \sum S^2(n(s,r)/N(r))$$

$$\Lambda(r) = Z^{(2)}/(Z^{(1)})^2$$

式中，$\Lambda(r)$ 为空隙度指数；$N(r) = 2(M-r+1)$ 为以 $r \times r$ 大小的滑箱滑动整个区域采样的总次数，M 为研究区域的边长；S 为景观组分在滑箱中出现的频数；$n(s,r)$ 为所研究景观组分占据 S 个格子的滑箱个数。

土壤线的数学表达式

赵宏康，陈烈英，张海青：遥感数据的裸沙土壤线校正方法．地理学报，1999，54(5)

$$\rho_R = b + a \cdot \rho_{IR}$$

式中，ρ_R 为红光反射率；ρ_{IR} 为近红外反射率；a 和 b 为常量。

调制传递函数 $T(L)$ 模型

熊桢，童庆禧，郑兰芬：若干平滑和插值方法对图像空间分辨力估算的影响　遥感学报，2000，4(1)

$$T(L)=\frac{|X(L)|}{\sum_{k=0}^{N-1}F(x_k)}$$

式中，$F(x_k)$ 为线扩展函数，$X(L)=\sum_{k=0}^{N-1}F(x_k)e^{jk\pi l/N}$。

估计非均匀冠层植被参数的混合模型

Gilabert M A, Haro F J G, Meliá J：在遥感中估计非均匀冠层的植被参数的混合模型方法　Remote Sensing of Environment, 2000, 72

(1) 模型的表达式为：

$$R_v(\lambda)=R_\infty(\lambda)+[\rho_s(\lambda)-R_\infty(\lambda)]\exp(-C\cdot l_{la})$$

式中，$R_v(\lambda)$ 是植物的反射系数；$\rho_s(\lambda)$ 是土壤的反射系数；$R_\infty(\lambda)$ 是反射系数的饱和值，是植物反射系数在大叶面积指数(l_{la})时的渐近值；C 是描述植物个体拦截辐射通量的能力的参数。

(2) 荫蔽土壤的反射系数：

$$R_{ss}(\lambda)=\rho_s(\lambda)\cdot[f_i+(1-f_i)(1-l_{la_1})^{\kappa}\tau^{k}]$$

式中，$R_{ss}(\lambda)$ 是部分荫蔽土壤的反射系数；$\rho_s(\lambda)$ 是阳光照射下土壤的反射系数；f_i 是阳光照射土壤的相对面积；l_{la_1} 是参数，表示为每一单层叶片的叶面积指数(l_{la})的函数，在[0,1]间取值；κ 是称为不透明因子的参数，k 是与结构有关的正的参数。

$$R(\lambda)=f_v[R_\infty(\lambda)-(\rho_s(\lambda)-R_\infty(\lambda))\exp(-C\cdot l_{la})]+ f_s\rho_s(\lambda)[f_i+(1-f_i)(1-l_{la_1})^{\kappa}]$$

式中，$R(\lambda)$ 是非均匀冠层的反射系数；f_v 是植被所占比例；f_s 是土壤所占比例。

基于分数布朗几何的粗糙表面模型

Zribi M, Ciarletti V, Taconet O：利用在 Orgeval 得到的 SIRC 和 ERASME 雷达数据对基于分数布朗几何的粗糙表面模型进行验证　Remote Sensing of Environment, 2000, 73

分数布朗几何模型运用在整个土壤剖面测量值的集合，其方程为：

$$E[|h(x+\Delta x)-h(x)|]=\Delta x^{H}E[|h(x+1)-h(x)|]$$

式中，$h(x)$ 是在位置 x 处的土壤表面的高度；而 $E[\ ]$ 表示求平均值；参数 H 被称为 hurst 指数，其变化范围为 0 到 1，其与分形维数 D 的联系为：

$$H=2-D$$

FLIM 模型及其修正

Hu B, Inannen K, Miller J R：从在 BOREAS 通量塔传感器上方的 CASI 数据中获取叶面积指数和冠层闭合度　Remote Sensing of Environment, 2000, 74

(1) FLIM 模型：

FLIM 模型一个描述森林冠层的二向反射特性的随机模型，它同时考虑了上层林冠的荫蔽影响和树冠的透射。在 FLIM 模型中传感器观测到的景物的反射处理为地面反射和一个均匀而且无穷厚的森林冠层的反射的加权求和，可表示为下式：

$$R=R_cC-R_gG$$

式中，R 是景物的反射系数；R_c 和 R_g 分别是均匀且无穷厚的森林冠层和地面层植被的反射系数；C 和 G 分别是所谓的树冠因子和地面因子，其受树冠大小，树的密度，叶面积指数，以及树冠的覆盖率和穿过树冠的透射率。

在 FLIM 模型中，在观察方向及日照方向上的树冠覆盖率和树冠透射率的计算公式如下：

$$C_v=1-\exp(-nA/\cos\theta_v)$$

$$C_s=1-\exp(-nA/\cos\theta_s)$$

$$T_v=\exp[-G(\theta_v)L_e/\cos\theta_v]$$

$$T_s-\exp[-G(\theta_s)L_e/\cos\theta_s]$$

式中，C_v 和 C_s 分别是在观察方向和日照方向上的树冠覆盖率；T_v 和 T_s 分别是在观察方向和日照方向上穿过树冠的透射率；θ_v 和 θ_s 分别是观察和日照的顶角；A 是传感器视场或像元尺度的覆盖区的面积；n 是像元中树的密度；L_e 是树冠的平均有效叶面积指数，$G(\theta_v)$ 和 $G(\theta_s)$ 分别是整个观察区域与观察顶角正交的面积及与太阳顶角正交的面积所占比例。

地面因子定义为：

$$G=F_{cd}T_sT_v+F_{cs}T_v+F_{od}T_s+T_{os}$$

式中，F_{cd} 是同时处在日照和观察方向上的树冠的面积；F_{os} 是同时处在日照和观察方向上的空隙；F_{cs} 是在日照方向上是空隙而在观察方向上是在树冠下面的区域；F_{od} 是在日照方向上是在树冠下面而在观察方向上是空隙的区域。

树冠因子定义为：

$$C = (1 - T_sT_v)C_sC_v$$

(2) FLIM 模型的修正：

对在 BOREAS 通量塔位置处的针叶林冠层，树冠可假设为一个椭圆体，其水平半径为 b，垂直半径为 r，对 FLIM 模型加以修正，以考虑到树冠形状对投影到地面的阴影形状的影响。

$$C_v = 1 - \exp(-n\pi r^2 / \cos\theta_v')$$

$$C_s = 1 - \exp(-n\pi r^2 / \cos\theta_s')$$

$$\tan\theta_v' = (b/r)\tan\theta_v$$

$$\tan\theta_s' = (b/r)\tan\theta_s$$

$$T_v = \exp\left[-G(\theta_v)L_e\frac{C_{\text{nadir}}}{C_v\cos\theta_v}\right]$$

$$T_s = \exp\left[-G(\theta_s)L_e\frac{C_{\text{nadir}}}{C_s\cos\theta_s}\right]$$

(3) 几何因子的估计：

在顶角 θ 处的间隙比例 $p(\theta)$ 为：

$$p(\theta) = e^{-G(\theta)L_e/\cos\theta}$$

如果测量了间隙比例在顶角取多个值时的值，则 L_e 可通过下式计算：

$$L_e = \int_0^{2\pi}\ln\left[\frac{1}{p(\theta)}\right]\cos\theta\sin\theta\,\mathrm{d}\theta$$

气溶胶模型

Veefkind J P, Leeuw G, Stammes P et al：从 ATSR-2 和 GOME 获得的陆地上方气溶胶的区域分布。Remote Sensing of Environment, 2000, 74

(1) 气溶胶的尺度分布可描述为：

$$\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}r} = \frac{A}{f}\exp\left[-\ln^2\left(\frac{r}{f\cdot r_0}\right)\right]$$

式中，N 是每 cm^3 中粒子的总数；r 是粒子的半径；r_0 是模半径；A 是变化幅度；f 是膨胀因子，其依赖于相对湿度，当相对湿度为 80%时，定义为 1。

(2) ATSR-2 双重视角算法：

卫星传感器观测到的大气顶部(TOA)的反射系数可近似为：

$$\rho(\lambda) = \rho_a(\lambda) + \frac{\rho_s(\lambda)}{1 - R_s(\lambda)s(\lambda)}T(\lambda)$$

式中，$\rho_a(\lambda)$ 是大气散射(路径反射)的贡献成分；ρ_s 是地表直接反射系数；R_s 是地表漫反射率；T 是沿下行和上行方向穿过大气层的总的透射率(直射成分加上漫射成分)；s 是大气对上行直射辐射的球面漫反射率；λ 是波长。

前向观察地表反射[$\rho_{s,f}(\lambda)$]可写为：

$$\rho_{s,f}(\lambda) = k\rho_{s,n}(\lambda)$$

式中，$\rho_{s,n}$ 是底角观测到的地表反射；k 是与波长无关的、仅依赖于太阳/卫星位置的几何关系的前向观测与底角观测的地表反射的比值。

(3) 通过组合前向观测和底角观测信息，未知的地表反射系数(ρ_s)与未知的地表漫反射率(R_s)可消除掉：

$$\frac{\rho_n(\lambda) - \rho_{a,n}(\lambda)}{T_n(\lambda)} = \frac{\rho_f(\lambda) - \rho_{a,f}(\lambda)}{kT_f(\lambda)}$$

式中，下标 n 和 f 分别表示底角与前向观测。这个方程奠定了双重观测算法的基础。

假设路径反射系数随着气溶胶光学厚度(AOD)呈线性增加关系：

$$\rho_a(\lambda) = \rho_0(\lambda) + c(\lambda)\cdot AOD(\lambda)$$

式中，ρ_0 是在存在气溶胶时大气的路径反射系数；c 是 ρ_a 随 AOD 变化的斜率。

AOD 可通过一迭代方法计算，在第 i 步迭代，AOD 为：

$$AOD^i(\lambda) = \left[\frac{\rho_n'(\lambda)}{T_n^{i-1}(\lambda)} - \frac{\rho_f'(\lambda)}{k^i\cdot T_f^{i-1}(\lambda)}\right]\times\left[\frac{c_n(\lambda)}{T_n^{i-1}(\lambda)} - \frac{c_f(\lambda)}{k^i\cdot T_f^{i-1}(\lambda)}\right]$$

式中，$\rho' = \rho - \rho_0$，第 i 步迭代时的比值 k 从 1.6μm 波段计算得：

$$k^i = \frac{\rho_f(1.6\,\mu\text{m}) - \rho_{a,f}^{i-1}(1.6\,\mu\text{m})}{\rho_n(1.6\,\mu\text{m}) - \rho_{n,f}^{i-1}(1.6\,\mu\text{m})}$$

(4) GOME UV 方法：

在无云的情况下，垂直均匀的，覆盖在漫反射率为 R_s 的朗伯表面上的大气层顶部的反射可写为：

$$\rho(\lambda) = \rho_a(\lambda) + \frac{R_s(\lambda)}{1 - R_s(\lambda)s(\lambda)}T(\lambda)$$

土地覆盖类型面积大小的预测模型

Brum S：利用分类图像和地学统计方法预测土地覆盖类型的面积大小 Remote Sensing of Environment, 2000, 74

类型s_k在区域A内所占比例等于s_k占据的像元的数目除以A中总的像元数目(N)：

$$f(A;s_k)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}f(\boldsymbol{u}_i;s_k)$$

式中，$f(\boldsymbol{u}_i;s_k)=\begin{cases}1 & (s(\boldsymbol{u}_i)=s_k)\\0 & (其他)\end{cases}$，$\boldsymbol{u}_i$表示第$i$个像元的位置；$s(\boldsymbol{u}_i)$表示位置$\boldsymbol{u}_i$的土地覆盖类型；由于实际的$s(\boldsymbol{u}_i)$未知，其用随机变量$s(\boldsymbol{u}_i)$来描述，$f(\boldsymbol{u}_i;s_k)$通过随机变量$F(\boldsymbol{u}_i;s_k)$来描述：

$$E[F(\boldsymbol{u}_i;s_k)]=$$

$$1\cdot \text{Prob}\{S(\boldsymbol{u}_i)=s_k\}+0\cdot \text{Prob}\{S(\boldsymbol{u}_i)\neq s_k\}=p(\boldsymbol{u}_i;s_k\mid \boldsymbol{x}_i)$$

$$Var[F(\boldsymbol{u}_i;s_k)]=p(\boldsymbol{u}_i;s_k\mid \boldsymbol{x}_i)[1-p(\boldsymbol{u}_i;s_k\mid \boldsymbol{x}_i)]$$

式中，$p(\boldsymbol{u}_i;s_k\mid \boldsymbol{x}_i)$给定相应的光谱属性矢量$\boldsymbol{x}_i$时位置$\boldsymbol{u}_i$属于类型$s_k$的条件概率的估计值，是区域比例的期望值可表达为$E[F(A;s_k)]=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}p(\boldsymbol{u}_i;s_k\mid \boldsymbol{x}_i)$，$N$是区域中像元的总的数目。

BRDF 校正模型

Shepherd J D, Dymond J R：植被的 AVHRR 图像的二向反射分布函数(BRDF)的校正 Remote Sensing of Environment, 2000, 74

(1) 单重散射(可见光)冠层的辐射L_{vis}模拟为：

$$L_{\text{vis}}=\frac{2wE\cos\theta_i}{3\pi^2(\cos\theta_i+\cos\theta_e)}[a+(\pi-a)e^{-k\alpha^2}]$$

式中，E是直射阳光的辐射通量密度；α是相角；θ_i是入射角；θ_e是出射角；w是两倍叶反射系数，a和k是冠层表面结构的特征参数。

(2) 多重散射(近红外光)冠层辐射L_{nir}模拟为：

$$L_{\text{nir}}=\frac{wE\cos\theta_i}{4\pi(\cos\theta_i+\cos\theta_e)}\times\left\{\frac{8}{3\pi}[a+(\pi-a)e^{-k\alpha^2}]+H(\theta_i,w)H(\theta_e,w)-1\right\}$$

式中，$H(\theta,w)=\frac{1+2\cos\theta}{1+2\cos\theta\sqrt{1-w}}$；$H$函数表示冠层内的多重散射

(3) 冠层对可见光及近红外光的二向反射因子ρ_{vis}和ρ_{nir}可写为：

$$\rho_{\text{vis}}=\frac{2w}{3\pi(\cos\theta_i+\cos\theta_e)}[a+(\pi-a)e^{-k\alpha^2}]$$

$$\rho_{\text{nir}}=\frac{w}{4(\cos\theta_i+\cos\theta_e)}\times\left\{\frac{8}{3\pi}\left[a+(\pi-a)e^{-k\alpha^2}\right]+H(\theta_i,w)H(\theta_e,w)-1\right\}$$

已知二向反射因子可对得到的表面反射系数ρ通过一个标度因子λ修正为一个标准方向的反射系数$\hat{\rho}$：

$$\hat{\rho}=\lambda\rho$$

$$\lambda_{\text{vis}}=\frac{\cos\theta_i+\cos\theta_e}{\cos\hat{\theta}_i+\cos\hat{\theta}_e}\frac{a+(\pi-a)e^{-k\hat{\alpha}^2}}{a+(\pi-a)e^{-k\alpha^2}}$$

$$\lambda_{\text{nir}}=\frac{\cos\theta_i+\cos\theta_e}{\cos\hat{\theta}_i+\cos\hat{\theta}_e}\times\frac{\frac{8}{3\pi}[a+(\pi-a)e^{-k\hat{\alpha}^2}]+H(\hat{\theta}_i,w)H(\hat{\theta}_e,w)-1}{\frac{8}{3\pi}[a+(\pi-a)e^{-k\alpha^2}]+H(\theta_i,w)H(\theta_e,w)-1}$$

式中，$\hat{\theta}_i$，$\hat{\theta}_e$和$\hat{\alpha}$分别是标准入射角、出射角和相角。

土地覆盖分类的机器学习算法的多种判据

Fries R S D, Chan J C W：评价利用卫星数据进行土地覆盖分类的机器学习算法的多种判据 Remote Sensing of Environment, 2000, 74

(1) 给定属于k个类型$\{C1, C2,\cdots, Ck\}$中某个类型的供训练的观测数据集合T，确定T中一个观测值的类型所需的信息量为：

$$info(T)=-\sum_{j=1}^{k}\frac{freq(C_j,T)}{|T|}\times\log_2\frac{freq(C_j,T)}{|T|}$$

式中，$freq(C_j,T)$等于T中属于类型C_j的样本的数目；$|T|$是T中观测样本的总数目。

给定测试方法X，在测试方法X中把T分为n个部分，应用X后的信息量为：

$$info_x(T)=\sum_{i=1}^{n}\frac{|T_i|}{|T|}\times info(T_i)$$

(2) 应用X对T进行分割所得到的信息增益为：

$$gain(X)=info(T)-info_x(T)$$

“增益判据”即选择$gain(X)$最大的测试方法，为了补偿分割类型数目大时具有的优势，引入下面的因子对$gain(X)$进行标准化：

$$split\ info(X) = -\sum_{i=1}^{n}\frac{|T_i|}{|T|}\times\log_2\left(\frac{|T_i|}{|T|}\right)$$

(3) 分割量度为：

$$gain\ ratio(X) = gain(X) split\ info(X)$$

植被水分含量的计算模型

Serrano L, Ustin S L, Roberts D A et al: 从AVRIS数据获取丛林植被的水分含量 Remote Sensing of Environment. 2000, 74

(1) 叶片的水分含量表示为相对水分含量(RWC)，通过下式计算：

$$\text{RWC} = (FW - DW)/(TW - DW)$$

式中，FW 是植物鲜重；DW 是干重；TW 是水分饱和时的重量。

(2) 冠层相对水分含量(R_{wc})表示为：

$$\text{RWC}_{\text{Canopy}} = \sum_{i=1}^{n}(R_{\text{WC}_i}C_iH_i)$$

式中，R_{WC_i} 是植物类型 i 的叶片 R_{WC}；而 C_i 是第 i 类植物在多边形中占据的总面积的比例；H_i 是植物的高度。

(3) 植被 R_{WC} 表示为：

$$\text{RWC}_{\text{Vegetation}} = \left[\sum_{i=1}^{n}(R_{\text{WC}_i}\cdot RC_i)\right](CH)$$

式中，RC_i 是第 i 类植物的相对覆盖；C 是植被层；H 是平均冠层高度。

基于生理视觉的静态边界模型

周红建，周宗潭，李柏迎等：一种从ERS-1 SAR海洋图像中检测船舶航迹的算法 遥感学报，2000，4(1)

中心位于(i, j)且方位为 k 时：

$$O_{ij} = \sum_k h(z_{ijk})$$

$$h(z) = L(z - Z_0)^+$$

式中，z_{ijk} 为双极细胞。

水稻微波后向散射模型

曹琪明，马洪兵，张涛：水稻微波后向散射系数的模拟分析 遥感学报，2000，4(1)

$$I^{bs}(\mu_0,\phi_0) = T(\mu_0,\phi_0)I_0$$

式中，I_0 为入射的 Stokes 矢量

R_ω 是反射率矩阵：

$$\begin{aligned}T(\mu_0,\phi_0) = &\frac{1}{\mu_0}QD_\tau(\mu_0,\phi_0\pm\pi;-h\ \ \mu_0)\times\\ &Q^{-1}R_\omega(\mu_0,\phi_0\pm\pi)QA_1Q^{-1}\times\\ &R_\omega(\mu_0,\phi_0)D_\tau(\mu_0,\phi_0;-h\ \ \mu_0)Q^{-1}+\\ &\frac{1}{\mu_0}QD_\tau(\mu_0,\phi_0\pm\pi;-h\ \ \mu_0)\times\\ &Q^{-1}R_\omega(\mu_0,\phi_0+\pi)QA_2Q^{-1}+\\ &\frac{1}{\mu_0}QD_\tau(\mu_0,\phi_0;-h/\mu_0)\times\\ &Q^{-1}R_\omega(\mu_0,\phi_0)QA_3Q^{-}+\frac{1}{\mu_0}QA_4Q^{-1}\end{aligned}$$

式中，Q 和 Q^{-1} 分别是衰减矩阵 k_τ 的特征矢量组成的矩阵及其逆矩阵；D_τ 是与 k_τ 的特征值有关的对角矩阵，A_1、A_2、A_3 和 A_4 分别为：

$$\begin{aligned}A_1 = &\int_{-h}^{0}\{D_\tau[-\mu,\phi;-(z'+h)/\mu]Q^{-1}\times\\ &P_\tau(-\mu,\phi;\ \mu_0,\phi_0)QD_\tau\times[\mu_0,\phi_0;-(z'+h)/\mu_0]\}\mathrm{d}z'\\ A_2 = &\int_{-h}^{0}\{D_\tau[-\mu,\phi;-(z'+h)/\mu]\times\\ &Q^{-1}P_\tau(-\mu,\phi;-\mu_0,\phi_0)QD_\tau\times(-\mu_0,\phi_0;\ z'/\mu_0)\}\mathrm{d}z'\\ A_3 = &\int_{-h}^{0}\{D_\tau(\mu,\phi;\ z'/\mu)\times Q^{-1}P_\tau(\mu,\phi;\ \mu_0,\phi_0)QD_\tau\times\\ &[\mu_0,\phi_0;-(z'+h)/\mu_0]\}\mathrm{d}z'\\ A_4 = &\int_{-h}^{0}[D_\tau(\mu,\phi;\ z'/\mu)\times Q^{-1}P_\tau(\mu,\phi;-\mu_0,\phi_0)\times\\ &QD_\tau(-\mu_0,\phi_0;\ z'/\mu_0)]\mathrm{d}z'\end{aligned}$$

多源信息融合分析的证据推理模型

方勇：证据推理应用于多源信息融合分析 遥感学报，2000，4(2)

(1) 信任函数：对于 $2^\Theta\in[0,1]$，2^Θ 为辨别框构成的假设空间，$\forall A\subseteq\Theta$。

$$Bel(A) = \sum_{B\subseteq A}m(B)$$

(2) 似然函数：对于 $2^\Theta\in[0,1]$，$\forall A\subseteq\Omega$，$A^c = \Theta - A$

$$PL(A) = 1 - Bel(A^c) = \sum_{B\cap A\neq\phi}m(B)$$

(3) 证据合并的 Dempster 法则：

$$Bel = [\cdots(Bel_1\oplus Bel_2)\cdots]\oplus Bel_n$$

海水微波测厚理论模型

郭凤莲，赵仁宇，王维滨：无源微波遥感技术在海水测厚中的应用．遥感学报，2000，4(2)

(1) 穿透深度(δ)模型：

$$\delta = \frac{1}{\pi}\lambda\frac{\sqrt{\varepsilon'}}{\varepsilon''}$$

式中，λ为辐射波长；ε'和ε''分别为介电常数的实部和虚部．对于海水有$\varepsilon' = 4.9 + \frac{\varepsilon_0 - 4.9}{1+(2\pi f\tau)^2}$，$\varepsilon'' = 2\pi f\tau\frac{\varepsilon_0 - 4.9}{1+(2\pi f\tau)^2} + \frac{\sigma_b}{2\pi f\varepsilon_0}$。

(2) 海水微波辐射亮温值(T_B)模型：

$$T_B = a - be^{-cd}$$

式中，a，b和c为系数；d为海冰厚度；e为辐射率．

混合像元组分温度的多角度遥感数据反演模型

陈良富，庄家礼，徐希孺：用多角度遥感数据反演混合像元组分温度的可行性分析．地理研究，2000，19(2)

(1) 非同温混合像元热辐射模型：

$$\varepsilon_e(\theta) = \sum_{i=1}^{n}\varepsilon_{ei}(\theta)$$

$$L(\theta) = \sum_{i=1}^{n}\varepsilon_{ei}(\theta)L_b(T_i)$$

$$\varepsilon_e(\theta) + \rho_{\theta\to\Omega} \equiv 1$$

式中，$\varepsilon_e(\theta)$为总有效比辐射率；$\varepsilon_{ei}(\theta)$为各组分辐射亮度值；$L(\theta)$为总辐射亮度值；T_i为各组分温度；$\rho_{\theta\to\Omega}$为半球反射率．

(2) 连续植被非同温混合像元辐射亮度模型：

$$L(\theta) = \varepsilon_{ve}(\theta)\cdot L_b(T_v) + \varepsilon_{se}(\theta)\cdot L_b(T_s)$$

式中，$L(\theta)$为混合像元的辐射亮度值；$\varepsilon_{ve}(\theta)$和$\varepsilon_{se}(\theta)$分别为植被冠层和土壤的有效发射率；T_v和T_s分别为植被冠层和土壤的温度。

(3) 土壤比辐射率比值计算公式：

$$\varepsilon_{ir} = \frac{\varepsilon_i(\theta)}{\varepsilon_i(0)} = \frac{L_i(\theta) - L_{bi}(T_a)}{L_i(0) - L_{bi}(T_a)}$$

式中，$L_i(\theta)$为第i通道θ视角的辐射亮度观测值；$L_{bi}(T_a)$为大气下行辐射值。

(4) 由于大气测量误差而带来的大气噪声计算公式：

$$\Delta L_{ia} = \Delta L_{ai}^{\uparrow} - \Delta t_{oi}\int_{2\pi} f(\Omega\to\Omega)L_{ai}^{\downarrow}(\theta)\cos\theta'\mathrm{d}\Omega$$

式中，由于大气测量误差而带来的大气噪声ΔL_{ia}；$\Delta L_{ai}^{\uparrow}$为第i波段大气上行辐射测量误差；$L_{ai}^{\downarrow}(\theta)$为第$i$波段大气下行辐射测量误差；$\Delta t_{oi}$为第$i$波段从地面到传感器的大气透过率的测量误差。

(5) 信噪比计算公式：

$$\frac{S}{N} = \frac{[\varepsilon_{ve}L_{bi}(T_v) + \varepsilon_{se}L_{bi}(T_s)]\cdot t_{oi}}{\Delta L_{ia}}$$

式中，$\frac{S}{N}$为信噪比．

贡献率

廖明生，朱攀，龚健雅：基于典型相关分析的多元变化检测．遥感学报，2000，4(3)

$$\eta_j = \frac{\gamma_j}{\sum_{i=1}^{p}\gamma_i} \qquad (i = 1,2,\cdots,p)$$

式中，γ_j为第j个M变量的方差．

多角度POLDER数据互易原理的验证模型

刘强，李小文，王锦地：用多角度POLDER数据验证互易原理在遥感像元尺度的适用性．遥感学报，2000，4(3)

1. 遥感数据中的不互易现象

不互易度模型：

$$D_j = 2\frac{\left|R_j^1 - R_j^2\right|}{R_j^1 + R_j^2} \qquad (j = 1,2,3,4)$$

式中，R为反射率，j用于指示反射率及不互易度的波段。

波段间不互易度的相关性模型：

$$A_{ij} = \frac{Cov(D_i, D_j)}{\sqrt{Var(D_i)\times Var(D_j)}}$$

$$(i, j = 1,2,3,4)$$

式中，$Cov()$表示协方差函数；$Var()$表示方差函数。

2. 不互易性与其他地学参数的关系

不互易性对计算I_{ndv}的影响：

$$I_{ndv}=\frac{(R_4^1+R_4^2)-(R_2^1+R_2^2)}{(R_4^1+R_4^2)+(R_2^1-R_2^2)}$$

I_{ndv} 与不互易度的相关系数模型：

$$f(I_{ndv},D_j)=\frac{Cov(I_{ndv},D_j)}{\sqrt{Var(I_{ndv})\times Var(D_j)}}$$

高分辨率遥感影像的几何纠正模型

张继贤，林宗坚，张永红等：无 DEM 支持的遥感正射影像制作。遥感学报，2000，4(3)

1. 平坦区域遥感影像的纠正模型

$$\begin{cases}x=a_0+a_1X+a_2Y+a_3XY+a_4X^2+a_5Y^2\\ y=b_0+b_1X+b_2Y+b_3XY+b_4X^2+b_5Y^2\end{cases}$$

2. 中等起伏区域遥感影像的纠正模型

(1) 整体定向：

$$\begin{cases}x=c_0+c_1X+c_2Y+c_3XY\\ y=d_0+d_1X+d_2Y+d_3XY\end{cases}$$

(2) 图形图像局部配准纠正：

$$k=\frac{(4R_0+R_1+R_2)R_1R_2}{(R_0+R_1)(R_0+R_2)(R_1-R_2)}$$
$$\Delta x=k\Delta X,\Delta y=k\Delta Y$$

3. 高山起伏区域遥感影像的制作

(1) 几何纠正的共线方程：

$$\begin{bmatrix}X\\0\\-f\end{bmatrix}=\frac{1}{\lambda}\begin{bmatrix}a_1(t)&b_1(t)&c_1(t)\\a_2(t)&b_2(t)&c_2(t)\\a_3(t)&b_3(t)&c_3(t)\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}X-X_s(t)\\Y-Y_s(t)\\Z-Z_s(t)\end{bmatrix}$$

式中，x 为像点 P 的影像坐标；f 为时刻 t 的等效焦距，a_i，b_i 和 c_i 均是与旋转参数相关的参数；X，Y，Z 是点 P 的大地坐标；X_s,Y_s,Z_s 是对应时刻 t 扫描线上中心像元的大地坐标。

(2) 逐点纠正偏差值(ΔP)模型：

$$\Delta P=\frac{\sum_{i=1}^{4}\Delta P_i/r_i^2}{\sum_{i=1}^{4}r_i^{-2}}$$

式中，r_i 为 P 与 P_i 间的距离。

4. 高分辨率全色影像与低分辨率多光谱影像的融合(加权融合法)

模型为：$I'_{ij}=A(P_iI_i+P_jI_j)+B$

式中，P_i 和 P_j 为权系数，I_i 和 I_j 为待融合的遥感数据。

极化数据的目标分解模型

王翠珍，郭华东：极化雷达目标分解方法用于岩性分类. 遥感学报，2000，4(3)

(1) 目标的相关矩阵分解模型：

$$C=A_1\begin{bmatrix}|\alpha|^2&0&\alpha\\0&0&0\\\alpha^*&0&1\end{bmatrix}+A_2\begin{bmatrix}|\beta|^2&0&\beta\\0&0&0\\\beta^*&0&1\end{bmatrix}+A_3\begin{bmatrix}0&0&0\\0&1&0\\0&0&0\end{bmatrix}$$

式中，$A_1=\lambda_1\frac{\left[\gamma-1+\sqrt{\Delta}\right]^2}{\left[\gamma-1+\sqrt{\Delta}\right]^2+4|\rho|^2}$；

$A_2=\lambda_2\frac{\left[\gamma-1-\sqrt{\Delta}\right]^2}{\left[\gamma-1-\sqrt{\Delta}\right]^2+4|\rho|^2}$；

$A_3=\lambda_3$；

$\alpha=\frac{2\rho}{\gamma-1+\sqrt{\Delta}}$；

$\beta=\frac{2\rho}{\gamma-1-\sqrt{\Delta}}$；$\Delta=(\gamma-1)^2+4|\rho|^2$。

(2) 散射介质熵的模型：

$$H=\sum_{i=1}^{3}-p_i\log_3 p_i$$

式中，$p_i=\frac{\lambda_i}{\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3}$，$\lambda_1$，$\lambda_2$ 和 λ_3 为目标相关矩阵的 3 个特征值。

雪面反照率的反演模型

徐兴奎，田国良：中国地表积雪动态分布及反照率的变化. 遥感学报，2000，4(3)

(1) 新雪温度反演模型：

$$T_S=A_0+P\frac{T_4+T_5}{2}+M\frac{T_4-T_5}{2}$$

(2) 陈雪温度反演模型：

$$T_S=T_4+1.505(T_4-T_5)+1.164$$

上述两式中，P 和 M 是和下垫面热状况和物理状态相关的两个参数，由第 4，5 通道的比辐射率求得；T_4 和

T_5 分别为第 4，5 通道亮温(K)。

图像 DN 值与反射率关系模型

刘建贵，张兵，郑兰芬等：成像光谱数据在城市遥感中的应用研究．遥感学报，2000，4(3)

$$DN = kR + b$$

式中，DN 为图像亮度值，R 为反射率，k 和 b 为待求解的系数。

SAR 影像滤波模型

徐新，廖明生，卜方玲：一种基于相对标准差的 SAR 图像 Speckle 滤波方法．遥感学报，2000，4(3)

(1) Kuan 滤波模型：

$$g_{xy} = f_{xy} \cdot K + M(1-K)$$
$$K = \left[1 - \left(C_u^2/C_x^2\right)\right] / \left(1 + C_u^2\right)$$

式中，g_{xy} 和 f_{xy} 分别为处理后和处理前窗口中心像素灰度值；M 为窗口内所有像素的均值；K 为权重函数；C_x 为窗口相对标准差 σ_x / M。

(2) 增强的 Lee 滤波模型：

$$g_{xy} = \begin{cases} M & (C_x < C_u) \\ f_{xy}K + M(1-K) & (C_u < C_x < C_{max}) \\ f_{xy} & (C_x > C_{max}) \end{cases}$$

式中，f_{xy} 为中心像素灰度；M 为窗口均值，

$$C_{max} = \sqrt{3}C_u,$$
$$K = \exp[-(C_x - C_u)/(C_{max} - C_x)]$$

TM 对 NOAA 面积校正模型

袁超，赵宪文：TM 对 NOAA 面积校正模型的研究。遥感学报，2000，4(4)

(1) 空间分布维数 D_i 模型：

$$D_i = \frac{-\sum_{i=1}^{n} p_i \lg p_i}{\lg n}$$

式中，p_i 为地类块大小(%)；n 为地类块数量。

(2) 曲线面积(S)与长度(L)间的关系：

$$\lg S^{1/2} = C + 1/d \lg L$$

式中，d 为这个不规则多边形的分形维数。

(3) 回归校正模型：

A：

$$y(TM - S) = a_0 + a_1x_1(\text{AVHRR} - S) + a_2x_2(\text{AVHRR} - D_i) + a_3x_3(\text{AVHRR} - d)$$

B：

$$y(TM - S) = b_0 + b_1x(\text{AVHRR} - S)$$

蒙特卡罗模拟原理与方法

陈良富，庄家礼，徐希孺等：用 Monte Carlo 方法模拟连续植被热辐射方向性．遥感学报，2000，4(4)

(1) 非同温混合像元热辐射方向性模型：

$$L(\theta) = \varepsilon_{e1}(\theta) \cdot L_{bi}(T_1) + \varepsilon_{e2}(\theta) \cdot L_{bi}(T_2)$$

式中，$\varepsilon_{e1}(\theta)$，$\varepsilon_{e2}(\theta)$ 为组分有效比辐射率，$L_{bi}(T)$ 为第 i 通道的黑体辐射值。

(2) 模拟过程中的技术处理：

光学距离公式：

$$l = L \cdot (-G \cdot l_{la} / \cos\theta)$$

式中，G 为叶面沿光子 θ 方向的投影系数。

G 函数模型：

$$G(z,\Omega_p) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} d\varphi_l \int_0^l d\mu_l \cdot g(z,\Omega_l) \cdot |\Omega_l \cdot \Omega_p|$$

式中，Ω_p 为投影方向；$g(\mu_l, \varphi_l)$ 为叶子倾角分布密度函数，$\mu_l = \cos\theta_l$，θ_l 为叶子倾角；$|\Omega_l \cdot \Omega_p|$ 为光子和叶子的夹角：$|\Omega_l \cdot \Omega_p| = \cos\theta_l \cos\theta_p + \sin\theta_l \sin\theta_p \cos(\varphi_p - \varphi_l)$。

(3) 任意角 θ 的反射率(R)模型：

$$R = R_{max} \cos^b\left(\frac{\theta - \theta_{max}}{\omega}\right)$$

式中，R_{max} 为最大反射率；b 和 ω 为参数。

海冰密集度计算模型

赵进平，任敬萍：从航空数字影像提取北极海冰形态参数的方法研究。遥感学报，2000，4(4)

(1) 强度比[$\chi(k)$]模型：

$$\chi(k) = \delta(k)/\varepsilon(k) \qquad k \in [0,255]$$

式中，$\delta(k)$ 和 $\varepsilon(k)$ 均为所统计的像元数量。

(2) 海面尺度 D 模型：

$$D = \frac{dh}{\sqrt{x^2 + f^2}\cos(\alpha - \beta)}$$

式中，d 为像元尺度；f 为相机焦距；x 为像元距中心像元的距离；h 为飞机飞行高度；α 为相机斜角；β 为像元距中心像元的角度。

多光谱数据压缩系统基本方法

闫敬文，沈贵明，胡晓毅等：基于 KLT/WT 和谱特征矢量量化三维谱像数据压缩. 遥感学报，2000，4(4)

(1) 压缩比 CR 模型：

$$CR=\frac{Q\times n\times n}{n\times n+k\times n\times n+Q\times k}$$

式中：$n\times n$ 表示所分的子块大小；k 为保留的本征值的个数，Q 为光谱波段数。

(2) 改进的 SFCVQ(ISFCVQ)压缩编码：

$$E_1=\frac{1}{N_1}\sum_m Y_1$$

$$E_0=\frac{1}{N_0}\sum_{N_b-m} Y_0$$

式中，N_1 和 N_0 分别为 $Y_{i,j}^{ab}$ 为 1 和 0 的个数；Y_1 和 Y_0 分别对应 $Y_{i,j}^{ab}$ 为 1 和 0 的实际光谱幅值，分别有 m 和 N_n-m 个。

大气影响校正模型

Song C, Woodcock C E, Seto K C et al：利用 Landsat TM 数据进行分类和变化探测——何时及如何校正大气影响. Remote Sensing of Environment, 2001, 75

(1) 厚密暗植被方法(DDV)：

DDV 方法假设在一个场点存在厚密暗植被，对蓝光(TM1)及红光(TM3)其可被处理为暗对象，则可得 TM7 的表面反射系数与 TM1 及 TM3 的下述关系：

$$\rho_1=\rho_7/4$$

$$\rho_3=\rho_2/2$$

式中，ρ 代表表面反射系数；下标代表 TM 的波段。

(2) 路径辐射方法(PARA)：

Wen 等(1999)的 PARA 法从 DDV 发展而来，对 Landsat TM 图像，存在下面的关系：

$$\rho_1=\rho_1^*+\beta_1\rho_7$$

$$\rho_3-\rho_3^*+\beta_3\rho_7$$

式中，β_1 和 β_3 分别是线性关系的斜率；而 ρ_1^* 和 ρ_3^* 分别是由于路径辐射而来的表观反射系数。

冠层反射的简化模型

Dymond J R, Shepherd J D, Qi J：标准化光学卫星图像的植被反射的简化物理模型. Remote Sensing of Environment 2001, 75

(1) Dymond 和 Qi (1997)将厚植被冠层的辐射模拟为三个函数的乘积：

$$L=S(i,e)M(\alpha,i)B(\alpha)$$

式中，$S(i,e)$ 是冠层中阳光照射的比例，不包括互遮蔽部分；$M(\alpha,i)$ 是热点函数，针对冠层表面的互遮蔽性质对 $S(i,e)$ 加以修正；而 $B(\alpha)$ 是阳光照射的叶片的平均辐射。3 个函数给为：

$$S(i,e)=\frac{\cos i}{\cos i+(\sigma_i/\sigma_e)\cos e}$$

$$B(\alpha)=\frac{2wE}{3\pi^2}[\sin\alpha+(\pi/2-\alpha)\cos\alpha]$$

$$M(\alpha,i)=\begin{cases}2\exp\left[\dfrac{-\tan(\alpha/2)}{hi}\right] & (\alpha<\pi/2)\\ 2\exp\left[\dfrac{-\tan(\alpha/4)}{hi}\right] & (\alpha>\pi/2)\end{cases}$$

式中，i 是入射角；e 是出射角；α 是相角(由太阳、目标、观察者构成)；σ_i 和 σ_e 分别是在入射方向和出射方向上的叶片投影面积；h 是控制热点宽度的常数；w 是二倍叶片反射率；E 是太阳辐射通量密度。

(2) 假设叶片的方位随机分布(即 $\sigma_i=\sigma_e$)，对可见光，辐射可表示为：

$$L=\frac{2wE\cos i}{3\pi^2(\cos i+\cos e)}\{\alpha+[\pi-\alpha\exp(-k\alpha)]\}$$

方程可推广到近红外光的多重散射情形：

$$L=\frac{wE\cos i}{4\pi(\cos i+\cos e)}\times \frac{8}{3\pi}\{\alpha+[\pi-\alpha\exp(-k\alpha)]+H(\cos i)H(\cos e)-1\}$$

式中，$H(x)=\dfrac{1+2x}{1+2x\sqrt{1-w}}$；$k$ 是参数。

定量统计分析模型

范海生，马蔼乃，李京：采用图像差值法提取土地利用变化信息方法. 遥感学报，2001，5(1)

(1) 包含土地利用变化波谱信息的差值图像模型：(假定 $B^{t_1}=\{b_1^{t_1},b_2^{t_1},\cdots,b_N^{t_1}\}$、$B^{t_2}=\{b_1^{t_2},b_2^{t_2},\cdots,b_N^{t_2}\}$ 分别为 t_1 和 t_2 时相 N 波段遥感图像数据。)

$$D_k(i,j)=B_k^{t_2}-B_k^{t_1}$$

式中，k 代表广义上的任一波段数据。

(2) 变化像元(G_p)模型：

$$|G_p-M|>T\cdot STD$$

式中，M、STD 分别为差值图像灰度值统计均值和标准离散值；T 为变化阈法值。

Kappa 系数模型

关元秀，刘高焕，刘庆生等：黄河三角洲盐碱地遥感调查研究，遥感学报，2001，5(1)

$$\hat{K}=\frac{N\sum_{i=1}^{r}x_{ii}-\sum(x_{i+}x_{+i})}{N^2-\sum(x_{i+}x_{+i})}$$

式中，r 是误差矩阵的行数；x_{ii} 是 i 行 i 列(主对角线)上的值；x_{i+} 和 x_{+i} 分别是第 i 行和第 i 列的和；N 是样点总数。

人工神经网络遥感影像分类模型

骆剑承，周成虎，杨艳：人工神经网络遥感影像分类模型及其与知识集成方法研究，遥感学报，2001，5(1)

(1) 结点输出模型：

$$y=f\left(\sum_{i=0}^{n-1}w_ix_i-\theta\right)$$

式中，w_i 为连接权重；x_i 为输入向量 x 的第 i 分量值；θ 为输出阈值；f 为激励函数。

(2) 基于规则的 BPNN 分类模型：

总的可信度 m 模型：

$$m(G)=m_1\oplus m_2(G)=\frac{\sum_{x\cap y}m_1(x)\cdot m_2(y)}{1-\sum_{x\cap y=\phi}m_1(x)\cdot m_2(y)}$$

式中，G 为式中的一个子集；ϕ 为空集。

构造遥感数据向量的角度关系模型

马建文，刘素红，马超飞：遥感多维空间数据场特征的角度分析与应用，遥感学报，2001，5(1)

$$\cos\varphi=\frac{(x,y)}{|x||y|}$$

式中，两个非零向量 x,y 的夹角 φ 的范围为：$0\leqslant\varphi\leqslant\pi$；当 $(x,y)=0$ 时，则称 x,y 是正交的，且记为 $x\perp y$。

区域构造变形场及应力场定量分析模型

杨武年：川南区域构造变形及应力场遥感图像定量解析，遥感学报，2001，5(1)

(1) 板发生挠绕曲后，其挠度 $W(x,y)$ 应满足的挠曲微分方程：

$$D\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}+2\frac{\partial^2 w}{\partial x^2\partial y^2}+\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right)-\left(N_x\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+2N_{xy}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}+N_y\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)+KW=0$$

式中 N_x，N_y 和 N_{xy} 为薄板中面内力的 3 个分力。

(2) 板的挠弯刚度模型：

$$D=Et^3/12(1-v^2)$$

式中，E，v 分别为板的弹性模量和泊松量。

绿量的遥感测算模式

周坚华：城市绿量测算模式及信息系统，地理学报，2001，56(1)

(1) 逻辑斯蒂曲线方程：

$$y=1/\left(a+be^{-x}\right) \quad (1)$$

(2) 径-高方程：

$$y=1/\left(a+be^{-cx}\right) \quad (2)$$

式中：x 为树冠直径；y 为冠高；b 为回归系数；a、c 为系数。其图形为“异化逻辑斯蒂曲线”。对(2)式进行变量替换：

令 $$X=e^{-cx} \quad (3)$$

$$Y=1/y \quad (4)$$

代入式(2)而有 $Y=a+bX$。

遥感信息模型

马蔼乃：思维科学与地理思维研究，地理学报，2001，56(2)

$$\pi_y=a_0\pi_{x_1}^{a_1}\pi_{x_2}^{a_2}\cdots\pi_{x_n}^{a_n}$$

式中，π_y，π_{x_1}，π_{x_2}，…，π_{x_n} 是经过量纲分析的地理相似准则，是由各个圈层中的独立因子无量纲化组成的因子团；a_0 为地理系数；a_1，a_2，…，a_n 为地理指数。该式是一个灰色的非线性方程，凡是已经研究清楚的因子团，即地理相似准则，表明已经白化，凡是尚未

研究清楚的变量，都包含在a_0中，a_0仍旧属于黑箱范围内的不确定(时空)变量。

多光谱图像无损压缩变换

张荣，俞能海，刘政凯等：基于整数小波变换的多光谱图像无损压缩 遥感学报，2001，5(1)

1. 用提升法构造的几种常见的可逆整数小波变换

$$d_{j-1,l} = s_{j,2l+1} - [(s_{j,2l} + s_{j,2l+2})/2 + 1/2]$$

$$s_{j-1,l} = s_{j,2l} + [(d_{j-1,l-1} + d_{j-1,l})/4 + 1/2]$$

$$d_{j-1} = s_{j,2l+1} - [9(s_{j,2l} + s_{j,2l+2})/16 - (s_{j,2l-2} + s_{j,2l+4})/16 + 1/2]$$

$$s_{j-1,l} = s_{j,2l} - [(d_{j-1,l-1} + d_{j-1,l})/4 + 1/2]$$

$$d_{j-1} = s_{j,2l+1} - [9(s_{j,2l} + s_{j,2l+2})/16 - (s_{j,2l-2} + s_{j,2l+4})/16 + 1/2]$$

$$s_{j-1,l} = s_{j,2l} + [9(d_{j-1,l-1} + d_{j-1,l})/32 - (d_{j-1,l-1} + d_{j-1,l})/32 + 1/2]$$

2. 分类压缩方案

(1) 中心波段向量：

$$P_{\text{center}}(k) = \frac{\sum_{P \in s(k)} P}{N(k)}; k = 1,2,3,4$$

式中，p为波段矢量；$S(k)$为属于k类的波段向量集合；$N(k)$为属于k类的波段向量个数。

(2) 谱间预测器：

$$X(k,b) \quad k = 1,2,3,4; \quad b = 1,2,\cdots,B$$

式中，$[X(k, 1), X(k, 2), \cdots, X(k, B)] = P_{\text{center}}(k)$，$X$=spectrpd。

(3) 任一点$P(i,j,b)$的预测值模型：

$$\hat{P}(i,j,b) = X(x,b)$$

(4) 残差图像：

$$e(i,j,b) = P(i,j,b) - \hat{P}(i,j,b)$$

斜率法

李四海，恽才兴：河口表层悬浮泥沙气象卫星遥感定量模式研究 遥感学报，2001，5(2)

(1) 遥感器探测到的光谱反射率R_λ模型：

$$R_\lambda = (R_{r\lambda} + R_{a\lambda} + t_{d\lambda} R_{w\lambda}) t_{oz\lambda}$$

式中，$R_{r\lambda}$为 Rayleigh 散射的贡献；$R_{a\lambda}$为气溶胶散射的贡献；$R_{w\lambda}$为水面光谱反射率；$t_{d\lambda}$为双程的臭氧透过率；$t_{oz\lambda}$为双程漫透过率。

(2) 斜率关系模型：

$$\frac{dR_2}{dR_1} = \frac{dR_{w2}}{dR_{w1}}$$

式中，1 和 2 表示两个波段。

纹理特征统计量模型

吴均，赵忠明：利用基于小波的尺度共生矩阵进行纹理分析 遥感学报，2001，5(2)

$$f_1 = \sum_{i,j} \hat{\Phi}_k(i,j)^2$$

$$f_2 = -\sum_{i,j} \hat{\Phi}_k(i,j) \lg \hat{\Phi}_k(i,j)$$

$$f_3 = \sum_{i,j} \frac{(1-\mu_i)(1-\mu_j)}{\sigma_i \sigma_j} \hat{\Phi}_k(i,j)$$

$$f_4 = \sum_{i,j} \frac{1}{1+(i-j)^2} \hat{\Phi}_k(i,j)$$

$$f_5 = \sum_{i,j} (i-j)^2 \hat{\Phi}_k(i,j)$$

$$f_6 = \sum_{i,j} [(i-\mu_i)(j-\mu_j)]^3 \hat{\Phi}_k(i,j)$$

$$f_7 = \sum_{i,j} [(i-\mu_i)(j-\mu_j)]^4 \hat{\Phi}_k(i,j)$$

$$f_8 = \frac{\sum_{i,j} ij \hat{\Phi}_k(i,j) - \mu_i \mu_j}{\sigma_i \sigma_j}$$

$$\mu_i = \sum_i i \sum_j \hat{\Phi}_k(i,j)$$

$$\mu_j = \sum_j j \sum_i \hat{\Phi}_k(i,j)$$

$$\sigma_i = \sum_i (i-\mu_i)^2 \sum_j \hat{\Phi}_k(i,j)$$

$$\sigma_j = \sum_j (j-\mu_j)^2 \sum_i \hat{\Phi}_k(i,j)$$

式中，μ_i，μ_j，σ_i和σ_j分别为行与列的均值及方差。

系统误差与随机误差的分析处理模型

尤红建，刘彤，李树楷等：机载三维成像仪航带拼接的误差处理研究 遥感学报，2001，5(2)

(1) 重叠区域平均灰度差的最小的判断原则模

型：

$$\frac{\sum\limits_{i,j\in S}\left|g(i,j)_{\mathrm{R}}-g(i,j)_{\mathrm{L}}\right|}{n}=\min$$

式中，$g(i,j)_{\mathrm{R}}$ 和 $g(i,j)_{\mathrm{L}}$ 分别为重叠区右、左侧航带图像的灰度；S 为图像重叠的区域，一般为不规则的区域；n 为重叠区域内的图像点数。

(2) 变权的加权平均值模型：

$$g_{\mathrm{overlay}}=\frac{R_{\mathrm{L}}}{R_{\mathrm{R}}+R_{\mathrm{L}}}g_{\mathrm{R}}+\frac{R_{\mathrm{R}}}{R_{\mathrm{R}}+R_{\mathrm{L}}}g_{\mathrm{L}}$$

式中，R_{R}，R_{L} 分别为当前重叠区内的像元到重叠区最右、最左侧的距离；g_{R} 和 g_{L} 分别位重叠区右、左侧航带像元的灰度值。

作物冠层的能量平衡方程

颜春燕，牛铮，王长耀等：非单一地表对AVHRR图像计算所得蒸散的影响分析．遥感学报，2001，5(2)

$$LE=R_{\mathrm{n}}-G-H$$

式中，R_{n} 为净辐射；G 为冠层下面的土壤热通量；H，LE 分别为从冠层到空气的显热通量和潜热通量。

全极化散射的 Mueller 矩阵解

张戴，金亚秋：非均匀植被地表全极化散射的高分辨率雷达图像的模拟．遥感学报，2001，5(2)

(1) 散射场 $\bar{E}_{\mathrm{S}}$ 模型：

$$\bar{E}_{\mathrm{S}}=\begin{bmatrix}S_{\mathrm{VV}} & S_{\mathrm{VH}}\\ S_{\mathrm{HV}} & S_{\mathrm{HH}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}E_{\mathrm{V}i}\\ E_{\mathrm{H}i}\end{bmatrix}$$

(2) 散射强度 $\bar{I}_{\mathrm{S}}$ 模型：

$$\bar{I}_{\mathrm{S}}=\bar{\bar{M}}\cdot\bar{I}_i(\chi,\varphi)$$

$$\bar{\bar{M}}=\sum_{n=1}^{5}\bar{\bar{M}}_n$$

式中，$\bar{E}_i$ 为由椭圆角 χ 和方位角 φ 定义的任一极化的入射波；V 和 H 分别表示垂直和水平线极化；$\bar{\bar{M}}_1$ 为树冠中叶、茎的体散射；$\bar{\bar{M}}_2$ 为粗糙地面的面散射；$\bar{\bar{M}}_3$ 为树干的体散射；$\bar{\bar{M}}_4$ 为树冠-地表的散射；$\bar{\bar{M}}_5$ 为树干-地表的散射。

数字正射影像的关键镶嵌技术

刘晓龙：基于影像匹配接边纠正的数字正射影像的镶嵌技术．遥感学报，2001，5(2)

1．色彩平衡

(1) 基于“一阶”直方图的匹配模型：

$$g'_{\mathrm{R}(i,j)}=INT\left[\frac{(g_{\mathrm{L\,max}}-g_{\mathrm{L\,min}})g_{\mathrm{R}(i,j)}}{g_{\mathrm{R\,max}}-g_{\mathrm{R\,min}}}\right]+(\bar{g}_{\mathrm{L}}-\bar{g}_{\mathrm{R}})$$

(2) 基于信息熵的匹配模型：

$$g'_{\mathrm{R}(i,j)}=\frac{H_{\mathrm{L}}}{H_{\mathrm{R}}}\cdot(g_{\mathrm{R}(i,j)}-g_{\mathrm{R\,min}})+g_{\mathrm{L\,min}}$$

式中，$g_{\mathrm{L\,min}}$，$g_{\mathrm{L\,max}}$，H_{L} 和 $g_{\mathrm{R\,min}}$，$g_{\mathrm{R\,max}}$，H_{R} 分别为左影像的最小、最大灰度值、熵和右影像的最小、最大灰度值、熵。

2．影像镶嵌

(1) 基于灰度的镶嵌模型：

最小化灰度法模型：

$$A(i,j)=\sum_{k=-\frac{w}{2}+1}^{\frac{w}{2}}\left|L_{j+k}-R_{j+k}\right|$$

$$\left(\frac{w}{2}<j<W_{\mathrm{D}}-\frac{w}{2}\right)$$

二维镶嵌方法模型：

$$\begin{cases}V_k=\sum\limits_{i=-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}}d_{j,k+i}\\ H_k=\sum\limits_{i=-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}}d_{j+i,k}\end{cases}$$

式中，$A(i,j)$ 为以 (i,j) 为中心 $1\times w$ 邻域的像元灰度差绝对值和；L 和 R 分别为左、右影像的像元灰度值；W_{D} 为重叠位的宽度；V_k 和 H_k 分别为垂直和水平接边的灰差绝对值和。

(2) 基于色彩的镶嵌模型：

$$C_{j,k}=\left|I_{\mathrm{L}(j,k)}-I_{\mathrm{R}(j,k)}\right|+\left|H_{\mathrm{L}(j,k)}-H_{\mathrm{R}(j,k)}\right|+S\left|I_{\mathrm{L}(j,k)}-S_{\mathrm{R}(j,k)}\right|$$

式中，I_{L}，H_{L}，S_{L}，I_{R}，H_{R} 和 S_{R} 分别为左右影像 (j,k) 的强度、色度和饱和度。

小波多分辨率分析方法

吴奎桥，王汴，黄润恒等：基于小波多分辨率分析方法的海冰遥感影像数据融合．遥感学报，2001，5(2)

1. 小波分析的概念

(1) 连续小波变换模型：

$$W_f(a,b)=|a|^{-1/2}\int_R f(t)\overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}\mathrm{d}t$$

(2) 逆变换模型：

$$f(t)=\frac{1}{C_\Psi}\int_{R^\cdot}\int_R\frac{1}{a^2}W_f(a,b)\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)\mathrm{d}a\mathrm{d}b$$

式中，$\Psi(t)$ 为基本小波或母小波；$f(t)$ 为任意的函数；a 为伸缩因子 b 为平移因子。

2. 小波多分辨率分析

(1) 分解算法模型：

$$\begin{cases}c_n^{k-1}=\sum\limits_n a_{l-2n}c_l^k\\ d_n^{k-1}=\sum\limits_n b_{l-2n}c_l^k\end{cases}$$

(2) 重构算法模型：

$$c_n^k=\sum_n\left[p_{n-2l}c_l^{k-1}+q_{n-2l}d_l^{k-1}\right]$$

式中，$\{a_n\}$ 和 $\{b_n\}$ 为分解序列；$\{p_n\}$ 和 $\{q_n\}$ 为重构序列。

3. dbN 小波

转换函数的平方模模型：

$$|m_0(w)|^2=\left(\cos^2\frac{w}{2}\right)^N P\left(\sin^2\frac{w}{2}\right)$$

$$m_0(w)=\frac{1}{\sqrt{2}}\sum_{k=0}^{2N-1}h_k e^{-ikw}$$

分类 K-L 变换

倪林：基于分类 K-L 变换的多波段遥感图像近无损压缩方法。遥感学报，2001，5(3)

协方差矩阵模型：

$$Cov(i,j)=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}(p_{ki}-m_i)(p_{kj}-m_j)$$
$$(i,j=1,2,\cdots,B)$$

式中，p_{ki} 为向量 p_k 的第 i 个分量；m_i 为均值向量 m 的第 i 个分量。

影像压缩理论模型

袁修孝，李志林，林伟强：JPEG 压缩对摄影测量点定位精度的影响。遥感学报，2001，5(3)

(1) 影像的压缩比 R 模型：

$$R=\frac{\text{原始影像的大小}}{\text{压缩影像的大小}}$$

(2) 评价压缩影像质量的测度模型：

$$F=\frac{\sum\limits_{i=1}^{m}\sum\limits_{j=1}^{n}(g_{ij}\cdot g'_{ij})}{\sum\limits_{i=1}^{m}\sum\limits_{j=1}^{n}g_{ij}^2}$$

$$R_{\mathrm{PSN}}=10\cdot\lg\left(\frac{255}{\delta}\right)^2=48-20\cdot\lg\delta$$

$$\delta=\sqrt{\frac{1}{m\times n}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(g_{ij}-g'_{ij})^2}$$

式中，F 为解压影像相对于原始影像几何失真程度的逼真度；R_{PSN} 为解压影像相对于原始影像灰度偏离程度的峰值信噪比；g_{ij} 和 g'_{ij} 分别为原始影像和解压后重建影像的像素灰度。

误差模型

阎静，王汶，李湘阁：利用神经网络方法提取水稻种植面积——以湖北省双季早稻为例。遥感学报，2001，5(3)

$$e_i=\sum_j\left|y_j-v_j^m\right|$$

$$e_{\mathrm{t}}=\frac{1}{2N}\sum_{i=1}^{N}e_i^2$$

式中，e_i 和 e_{t} 分别为个体误差和总体误差；N 为样本数；j 为输出层神经元个数；i 为样本序列号，$i=1,2,\cdots,N$；y_j 为输出单元的期望输出；v_j^m 为实际的输出。

区域的线性蒸发散模型

陈云浩：中国西北地区蒸发散量计算的遥感研究。地理学报，2001，56(3)

1. 计算模型

(1) 地表热量平衡方程表达式：

$$R_{\mathrm{n}}=LE+H+G+PH$$

式中：LE 为潜热通量（$L=2.49\times10^6\,\mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot mm^{-1}}$，$E$ 为蒸散量，单位：mm）；R_{n} 为净辐射；H 为显热通量；G 为土壤热通量；它们的单位为 $\mathrm{W\cdot m^{-2}}$。PH 为用于植被光合作用和生物量增加的能量，由于其值

很小，在实际计算中可以忽略。

(2) 植被覆盖区和裸露土壤区所占比例的计算公式：

$$E = fE_g + (1-f)E_0 \quad ①$$

式中：E_g 为植被覆盖区蒸散量；E_0 为裸露土壤蒸发量；f 为像元中植被覆盖度，表示单位面积中植被所占比例；$1-f$ 表示单位面积中裸土所占比例。

(3) 日蒸发散量与任一时刻的蒸发散量存在的正弦关系表达式：

$$\frac{LE_d}{LE} = \frac{2N_E}{\pi \sin(\pi/N_E)} \quad ②$$

式中：LE_d 为日蒸发散量；LE 为时刻 t 蒸发散量；t 为卫星获取数据的时间；N_E 为日蒸发散时数，取比日照时数少 2 小时。至此，可根据①，②式推算出区域的日蒸发散量。

2. 参数求取

(1) 地表的辐射平衡方程表示如下：

$$R_n = Q(1-\alpha) + \varepsilon_\alpha \delta T_\alpha^4 - \varepsilon_s \delta T_s^4$$

式中：Q 为太阳总辐射；α 为地表反射率；δ 为 Stefan-Boltzmann 常数；$\varepsilon_\alpha \delta T_\alpha^4$ 为大气长波辐射，ε_α 为空气比辐射率，$\varepsilon_\alpha = 1.24(e_\alpha/T_\alpha)^{1/7}$；$e_\alpha$ 为气温 T_α 时的实际水汽压(hPa)；$\varepsilon_s \delta T_s^4$ 为地表长波辐射；T_s 为地表辐射温度。

(2) 行星反照率 α_p 与地表反照率 α 回归方程：

$$\alpha_p = 1.37 + 0.79\alpha$$

$$(R^2 = 0.768,\ \alpha = 0.005)$$

(3) G 的计算公式：

$$G = \begin{cases} \dfrac{T_0}{\alpha}(0.0032\alpha + \alpha^2)(1 - 0.978 I_{ndv^4}) R_n & \text{(植被覆盖)} \\ 0.20 R_n & \text{(裸露土壤)} \end{cases}$$

(4) 显热通量可以用湍流形式表现为：

$$H = \rho C_p (T_c - T_a)/r_a$$

式中：ρC_p 为空气的体积热容量；T_g 为参考高度处的空气温度；ρC_p 和 T_a 由气象数据提供；T_c 为蒸发散表面温度；对于裸土其蒸发散表面温度取地表面温度 T_{cs}；对于植被覆盖区其蒸发散表面温度取植被冠层温度 T_{cv}；T_{cs} 和 T_{cv} 可分别由 NOAA 第 4、5 通道的亮温求得；r_a 为空气动力学阻抗。

USLE 模型中植被覆盖因子的定量估算

马超飞，马建文，布和敖斯尔：USLE 模型中植被覆盖因子的遥感数据定量估算。水土保持通报，2001，21(4)

(1) 像元反射值模型：

$$r_i = \sum_{j=1}^{n}(a_{ij}x_j) + e_i$$

$$i = 1,2,\cdots,m$$

$$j = 1,2,\cdots,n$$

式中，r_i 为第 i 波段像元的反射值；a_{ij} 为第 i 波段该像元第 j 端元组分反射值；x_j 为该像元第 j 端元组分的丰度；e_i 为第 i 光谱波段误差项；m 为光谱波段数；n 为像元内端元组分数目。

(2) 非线性混合模型：

$$\begin{cases} w(\lambda) = \sum_{j=1}^{n} w_j(\lambda) F_j \\ F_j = \dfrac{M_j/e_j d_j}{\sum_{j=1}^{n}(M_j/e_j d_j)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} R(i,e) = \dfrac{w}{4}(\mu + \mu_0)[H(\mu)H(\mu_0)] \\ H(\mu) = \dfrac{1+2\mu}{1+2\mu\sqrt{1-w}} \end{cases}$$

式中，w 为均值 SSA(单一散射反照率)；λ 为光谱波段；n 为端元组分数目；F_j 为 j 端元组分相关几何横截面；M_j 为小地物群；e_j 为密度；d_j 为端元地物粒径大小；$R(i,e)$ 为二向反射 SSA 值；I 为入射角；e 为视角；$\mu = \cos i$；$\mu_0 = \sin i$；$H(\mu)$ 为小地物间多向散射的函数。

(3) 线性回归模型：

$$V_C = 108.49 I_c + 0.717$$

式中，V_C 为植被覆盖度；I_c 为归一化植被指数。

电波在地下介质中二维传播方程

姚萌，刘树人，杨燕：基于探地雷达的古墓遗址探测及数据后处理方法。遥感学报，2001，5(4)

$$\nabla^2 E_z = \mu_0 \varepsilon^* \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2}$$

$$v=\frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon^*}}$$

$$\varepsilon^*=\varepsilon'+j\varepsilon''$$

式中，v为电波传播速度；ε^*为介电常数。

变化向量的变化强度模型

陈晋，何春阳，史培军等：基于变化向量分析的土地利用/覆盖变化动态监测(I)——变化阈值的确定方法．遥感学报，2001，5(4)

$$\|\Delta G\|=\sqrt{(g_1-h_1)^2+(g_2-h_2)^2+\cdots+(g_k-h_k)^2}$$

$$\Delta G=G-H=\begin{pmatrix}g_1-h_1\\g_2-h_2\\\vdots\\g_k-h_k\end{pmatrix}$$

式中，$G=(g_1,g_2,\cdots,g_k)^T$和$H=(h_1,h_2,\cdots,h_k)^T$分别为时相t_1和t_2图像的像元灰级矢量。

Radon 变换模型

王世庆，金亚秋：SAR 图像船行尾迹检测的 Radon 变换和形态学图像处理技术．遥感学报，2001，5(4)

$$R(\rho,\theta)=\iint_D f(x,y)\delta(\rho-x\cos\theta-y\sin\theta)\mathrm{d}x\mathrm{d}y$$

式中，D为整个图像平面；$f(x,y)$为图像上(x,y)像素点灰度值；δ为狄拉克δ函数；ρ为(x,y)平面直线到原点距离；θ为原点到直线的垂线与x轴的夹角。

几何纠正的数学模型及其线性化

任留成，朱重光等：TM 图像的 SOMP 几何纠正法．遥感学报，2001，5(4)

SOM 投影公式：

$$X=a\int_0^{\lambda''}\frac{HJ-S^2}{(J^2+S^2)^{1/2}}\mathrm{d}\lambda-\frac{S}{F(J^2+S^2)^{1/2}}\ln\tan\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\phi''}{2}\right)$$

$$Y=a\int_0^{\lambda''}\frac{S(H+J)}{(J^2+S^2)^{1/2}}\mathrm{d}\lambda+\frac{J}{F(J^2+S^2)^{1/2}}\ln\tan\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\phi''}{2}\right)$$

式中，$S=\frac{P_2}{P_1}\left[\frac{1+T\sin^2\lambda''}{(1+W\sin^2\lambda'')(1+Q\sin^2\lambda'')}\right]^{1/2}\sin i\cos\lambda''$；

$$H=\sqrt{\frac{1+Q\sin^2\lambda''}{1+W\sin^2\lambda''}}\left[\frac{1+W\sin^2\lambda''}{(1+Q\sin^2\lambda'')^2}-\frac{P_2}{P_1}\cos i\right]；$$

$$F=\sqrt{\frac{1-Q\sin^2\lambda''}{1-T\sin^2\lambda''}}\left[1+\frac{u(1+Q\sin^2\lambda'')^2}{(1+W\sin^2\lambda'')(1+T\sin^2\lambda'')}\right]；$$

$$J=(1-e^2)^3；\quad Q=\frac{e^2\sin^2 i}{(1-e^2)}；\quad u=\frac{e^2\cos^2 i}{(1-e^2)}；$$

$$T=\frac{e^2\sin^2 i(2-e^2)}{(1-e^2)^2}；\quad W=\left(\frac{1-e^2\cos^2 i}{1-e^2}\right)^2-1；$$

P_1为地球自转周期；P_2为卫星运行周期；e为地球第一偏心率。

像元地面反射率的反演模型

李先华，黄雪樵，王小平等：卫星遥感数据的像元地面反射率反演计算

(1) 卫星像元地面反射率反演模型：

$$\gamma_{ij}=(DN_{ij}-D_{Aij})(1+L_{ij})\frac{\pi}{K}\tau_{ij}H_{ij}L_{ij}G_{ij}$$

式中，DN_{ij}为像元遥感数据；H_{ij}为地面光谱辐照度；D_{Aij}为大气程辐射遥感值；τ_{ij}为像元大气光谱透过率；L，F和G分别为水平地表上天空散射光与直射光强度之比、直射光改正系数和天空光改正系数

(2) 像元遥感数据的改进模型：

$$DN_{ij}^*=(DN_{ij}-DN_{Aij}-D_{Rij})\frac{1+L_{ij}}{F_{ij}+G_{ij}+L_{ij}}$$

式中，D_{Rij}为像元P_{ij}邻坡反射辐射的遥感数值；其他同上。

基于曲线论的变化探测模型

Yue TX, Chen S P, Xu B et al：基于曲线论的变化探测方法及其在黄河三角洲的应用．International Journal of Remote Sensing, 2002, 23

$$SAV(y,t)=\frac{1}{X}\sum_{x=1}^{X-1}ABS[v(x+1,y,t)-v(x,y,t)]$$

$$CAV(y,t)=\frac{1}{X}\sum_{x=1}^{X-2}\frac{v(x+2,y,t)-2v(x+1,y,t)+v(x,y,t)}{\{1+[v(x+1,y,t)-v(x,y,t)]^2\}^{\frac{3}{2}}}$$

$$CD(t)=\frac{1}{Y}\sum_{y=1}^{Y}\left[SAV^2(y,t)+CAV^2(y,t)+AV^2(y,t)\right]\left[1+SAV^2(y,t)\right]^{\frac{1}{2}}$$

式中，$v(x,y,t)=\frac{1+I_{ndv}(x,y,t)}{2}$，$I_{ndv}(x,y,t)$ 为像元 (x,y) 在时间 t 的植被指数；$ABS(N_{umber})$ 为 N_{umber} 的绝对值；$AV(y,t)=\frac{1}{X}\sum_{x=1}^{X}v(x,y,t)$。

研究结果表明，$CD(t)$ 可以描述植被的整体变化；$S_{AV}(t)$ 可以提供水域的环境变化信息；$C_{AV}(t)$ 可以显示工业区、基础设施和城市的区位。

第四章 地　图

横轴墨卡托投影和高斯-克吕格投影公式

方俊：横轴墨卡托投影和高斯-克吕格投影．地理学报，1955，21(1)

(1) 横轴墨卡托投影应用于正球面的坐标公式：

$$x - X_B = r\frac{l^2}{2}\sin B\cos B$$

$$y = r\left[l\cos B + \frac{1}{6}l^3\cos^3 B(1-t^2)\right]$$

式中，r 为地球半径；B 和 l 分别为各点的纬度及经度；$t=\tan B$；X_B 为已知点的纬度的经线长。

(2) 椭球面上的横轴墨卡托投影公式：

$$y = N\cos B\cdot l + \frac{N}{6}(1-t^2+\eta^2)\cos^3 B\cdot l^3 +$$

$$\frac{N}{120}(5-13t^2+t^4)\cos^5 B\cdot l^5$$

$$x - X_0 + \int_{B=B}^{B_1} M\mathrm{d}B$$

$$= \frac{N}{2}\sin B\cos B\cdot l^2 +$$

$$\frac{N}{24}\sin B\cos^3 B(5-t^2+5\eta^2)\cdot l^4 +$$

$$\frac{N}{720}\sin B\cos^5 B(61-58t^2+t^4)\cdot l^6$$

式中，M 为子午线方向曲率半径；N 为卯酉线方向曲率半径；其他变量含义同上。

等面积纬度和等量纬度与地理纬度的关系式

方俊：等面积纬度和等量纬度与地理纬度的关系．地理学报，1957，23(4)

(1) 等面积纬度与椭球面纬度 φ 的关系为：

$$r^2\sin\beta = \alpha^2(1-e^2)\left[\frac{\sin\varphi}{1-e^2\sin^2\varphi} + \frac{1}{2e}\ln\left(\frac{1+e\sin\varphi}{1-e\sin\varphi}\right)\right]$$

式中，β 为和椭球面纬度 φ 相当的等面积纬度；e^2 则为椭球面的离心率；α 为椭球面的长半径；r 为等面积球面的半径，它们的关系为：

$$r^2 = \frac{1}{2}a^2\left(1 - \frac{1-e^2}{2e}\ln\frac{1+e}{1-e}\right)$$

(2) 等量纬度与椭球面纬度的关系为：

$$\tan\frac{1}{2}(90^\circ-\beta) = \tan\frac{1}{2}(90^\circ-\varphi)\left(\frac{1+e\sin\varphi}{1-e\sin\varphi}\right)^{\frac{e}{2}}$$

式中，变量含义同上。

简单几何形体的高程面积曲线

毋河海：关于高程面积曲线及其应用问题．地理学报，1965，31(2)

(1) 圆锥体的高程面积曲线：

$$Y = H(1-K\sqrt{S})$$

式中，H 为高程带的高差；K 为等高距增长系数；S 为作为高程带界限的等高线所围的面积($0 \leqslant S \leqslant \pi R^2$)。

(2) 旋转抛物线体的高程面积曲线：

$$Y = H - \frac{P}{\pi}S$$

式中，H 为高程带的高差；P 为从图上量得的面积数值；S 为作为高程带界限的等高线所围的面积。

(3) 半旋转椭圆体及半球体的高程面积曲线：

$$Y = H\sqrt{1-K^2S}$$

式中，H 为高程带的高差；K 为等高距增长系数；S 为作为高程带界限的等高线所围的面积($0 \leqslant S \leqslant \pi R^2$)。

坐标变换的基本方法

吴忠性：如何从一种地图投影点的坐标变换到另一种地图投影点的坐标问题．地理学报，1979，34(1)

在两曲面或两平面之间可能有各种各样的对应关系，其中有一种叫做点的对应，可用下列关系式表示之。

$$X = F_1(x,y)$$

$$Y = F_2(x,y)$$

式中，X 和 Y 分别为一曲面上一点的曲线坐标；x 和

y 为另一曲面上对应点的曲线坐标。

实现由一种地投影点的坐标变换为另一种地图投影点的坐标,找出它的关系式,有两种方式。

(1) 反解原投影点的地理坐标,代入新投影中,求这两种投影点的直角坐标的关系式。

若地图资料投影点的坐标方程式为:

$$x = f_1(\varphi, \lambda)$$

$$y = f_2(\varphi, \lambda)$$

此方程式的反解为:

$$\varphi = \varphi(x, y)$$

$$\lambda = \lambda(x, y)$$

若新编地图投影点的坐标方程式为:

$$X = \psi_1(\varphi, \lambda)$$

$$Y = \psi_2(\varphi, \lambda)$$

则得两种投影点的直角坐标关系式:

$$X = F_1(x, y)$$

$$Y = F_2(x, y)$$

(2) 确定在地图资料和新编地图上相应点的直角坐标的直接联系。这种方法直接建立两种投影关系式:

$$X = F_1(x, y)$$

$$Y = F_2(x, y)$$

此关系式表达了编图过程是的数学实质(从地图资料到新编地图的转绘),并指出了地图资料和新编地图之间投影点的精确对应关系。

统计数据分析和分级方法(t 检验)

地图制图自动化组:使用电子计算机编《中华人民共和国恶性肿瘤地图集》方法试验　地理学报,1981,36(3)

$$t = \frac{P_i - P}{\sqrt{SP_i + SP^2}}$$

式中,P 为全国平均标化率;SP 为全国平均标化率的标准误;$P_i = \frac{\sum P_i' \cdot N_i}{\sum N_i} \cdot 100\,000$ 为各县标化率,P_i' 为各年龄组肿瘤死亡率、N_i 为我国各年龄组标准人口构成,i 为年龄分组数;$SP_i = \sqrt{\frac{\sum \frac{N_i P_i' g_i}{n_i}}{(\sum N_i)^2}}$ 为各县标化率的标准误,n_i 为待调整的统计资料各年龄组的人口数、$g_i = 1 - P_i'$

专题制图系统中面状符号、符号位置及独立符号子程序

傅肃性,曹桂发:现代专题制图系统中面状符号的软件研究　地理研究,1983,2(3)

1. 面状符号子程序

(1) 多边形轮廓坐标的变换:

将绘制的晕线等符号于坐标系 X 轴平行,将原来的闭合多边形边界坐标系旋转一角度(a)为新坐标系:

$$X_i' = X_i \cos\alpha - Y_i \sin\alpha$$

$$Y_i' = Y_i \cos\alpha - X_i \sin\alpha$$

(2) 插值计算以求得晕线端点的坐标值:

交点 $P(x, y)$的坐标插值公式:

$$X_j = X_i' + \Delta X(Y_j - Y_i')/\Delta Y$$

$$Y_j = N \cdot PAS$$

式中,X_j、Y_j 为交点坐标;N 为以轴为起始点的线划数(或行数);PAS 是划线之间距(及步距),$\Delta X = X_{i+1}' - X_i'$;$\Delta Y = Y_{i+1}' - Y_i'$。

(3) 端点坐标的配对:

$$OR = Y_{\min} + IN \cdot PAS$$

式中,OR 为该多边形中起始线划的坐标值;$Y_{\min}$ 为晕线端点坐标的最小坐标值;IN 为该多边形所配置晕线的技术值。

2. 符号位置计算子程序

(1) 绘图笔前进方向计算公式:

$$IA = (-1)^{IB}$$

式中,IB 为每一排符号的标号(以 X 坐标轴为起始的计算值)。

(2) 每一排应绘制符号数:

$$IM = |IX - IX_1|$$

$$IX = X_1 / P_{bs} - 0.5$$

$$IX_1 = X_2 / P_{bs} + 0.1$$

式中,X_1,X_2 为一排符号的左下角和右下角坐标连线端点(及连线的两端点)的 X 坐标值;P_{bs} 为每一个符号的横向间距。

(3) 每个符号的左下角坐标(A,B):

$$A = IJ \cdot P_{bs}$$

$$B = (Y_1 + Y_2) / 2.0$$

式中，IJ 为每一排符号的计数值(以坐标轴为起始计算的符号个数)；Y_1、Y_2 为一排符号的左右下角连线两端点的 Y 坐标值。

3. 独立符号子程序

(1) 坐标的增量(T_X, T_Y):

$$T_X = h_x A_t(K_X)$$

$$T_Y = h_y A_t(K_Y)$$

式中，h_x、h_y 为符号尺寸大小，其值应小于或等于符号的纵向和横向的间距；A_t 是符号比例常数存放的数据场；K_X 为 X 轴方向的网格比例数；K_Y 为 Y 轴方向的网格比例数。

(2) 绘图笔前进方向的坐标值(D_X, D_Y):

$$D_X = X + T_X$$

$$D_Y = Y + T_Y$$

式中，X、Y 为每个符号的左下角坐标。

叶片的水分指数(L_{WCI})计算模型

Hunt E R, Rock B N et al：通过红外反射系数测量叶片的相对水分含量. Remote Sensing of Environment, 1987, 22

$$L_{WCI} = \frac{-\lg[1-(TM4 - TM5)]}{-\lg[1-(TM4_{FT} - TM5_{FT})]}$$

式中，$TM4_{FT}$ 和 $TM5_{FT}$ 分别是在叶片充分膨胀时在 $TM4$ 和 $TM5$ 处的反射系数。

图像变换局部增强法公式

张晋，傅肃性，王恩晃：卫星数字图像处理与制图分析——以京津及邻区 1：25 万影像图的处理分析为例. 地理分析，1987, 6(2)

$$X = \frac{S'}{S + MAX/S'}(X - M) + A(M' - M) + M$$

式中，X、X' 分别为像元点的原始图像亮度值和变换后的值；M、S 分别表示 X 像元点周围 $N \times N$ 格像元邻域的均值的标准差；M'、S' 为给定所期望的均值和标准差；MAX、A 为调整参数。

森林潜热通量密度的遥感作图方法

Pierce L L, Congalton R G：森林潜热通量密度的遥感作图方法. Remote Sensing of Environment, 1988, 24

(1) 短波净辐射通量密度(Q^*)定义为:

$$Q^* = K_{\downarrow}(1 - \alpha)$$

式中，$K_{\downarrow}$ 是入射短波辐射(0.28~2.8 μm)；α 是给定表面的漫反射率。

(2) 长波净辐射通量密度通过下式确定:

$$L^* = R_{n_g} - Q_s^* + \varepsilon_g \sigma T_g^4 - \varepsilon \sigma T^4$$

式中，R_{n_g} 是在砂砾层表面测量的全波段净辐射(0.3~60.0 μm)；Q_s^* 是砂砾层表面上的短波净辐射通量密度；ε_g 是砂砾层的发射率；σ 是 Stephan-Boltzmann 常数；T_g 是砂砾层的温度；ε 是给定表面的发射率；T 是给定表面的温度。

(3) 某个像素在 LOWTRAN-6 波段 6 的原始数据对大气辐射及透射的校正公式为:

$$R_{corr} = \frac{R - R_a}{T_a}$$

式中，R 是未校正的波段 6 原始数据；R_a 是大气辐射；T_a(%)是大气透射系数。

(4) 真实表面辐射温度为:

$$T(K) = \frac{C_2 I_{HWN}}{\ln[C_1(I_{HWN}^3)/R_c + 1]}$$

式中，C_1=1.1910661× 10^{-5} (mW·m^{-2})；C_2=1.43883 (cm·K)；I_{HWN} 是半功率波数的倒数(cm^{-1})；R_c 是校正辐射。

(5) 表面动力学温度(T_k)为:

$$T_k = T_r(1/\varepsilon^{1/4})$$

式中，T_r 是表面辐射温度；ε 是表面发射率。

区域变量理论

Webster R, Curran P J, Munden J W：地面反射辐射的空间相关性及其在基于地面辐射测量的采样和作图中的意义. Remote Sensing of Environment, 1989, 29

(1) 关于弱平稳性的 Matheron 本质假说定义为:

$$E[z(x) - z(x+h)] = 0$$

$$\gamma(h) = \frac{1}{2}E[\{z(x) - z(x+h)\}^2]$$

式中，γ 即是半变量。

(2) 在间隔处 h 的自相关 $\rho(h)$ 为:

$$\rho(h) = 1 - \gamma(h) / \sigma^2$$

消除经纬仪高度对遮蔽角影响的计算方法

林少君：复杂遮蔽区域日照条件的研究．地理研究，1989，8(1)

(1) 水平投影法：

设$\alpha = 0$，即BA指向正北，p_i为遮蔽物i的顶点，p_{i1}为p_i点在测点A所在的水平面的投影，p_{i2}为点p_{i1}在测点B所在的水平面的投影。

$$H_{i1} = \frac{b \cdot \sin\beta_i}{\sin(\alpha_i - \beta_i)} \cdot \tan\delta_i$$

$$H_{i2} = \frac{b \cdot \sin\alpha_i}{\sin(\alpha_i - \beta_i)} \cdot \tan\gamma_i$$

式中，H_{i1}和H_{i2}分别为遮蔽物i在测点A和测点B所在平面上的高度；b为A，B两测点之间的水平距离；δ_i，α_i分别为A点所测的第i个目标的遮蔽角和方位角；γ_i，β_i分别为B点所测的第i个目标物的遮蔽角和方位角。

(2) 垂直投影法：

1) α_i(或β_i)$<3°$，α_i(或β_i)$>357°$，$177° < \alpha_i$(或β_i)$<183°$

2) δ_i(或γ_i)$>87°$，δ_i(或γ_i)$<3°$

$$\lambda_i = \arctan[\tan\delta_i \cdot (H_i + h_A) / H_i]$$

式中，λ_i为遮蔽物i对测点地面的实际遮蔽角。

$$W_i = \alpha_i + \alpha_A$$

式中，W_i为遮蔽物i相对于测点A的实际方位；α_A为基线BA的实际方位角，若计算所得$W_i > 360°$，则取$W_i = W_i - 360°$

地表能量平衡成分图制作的相关模型

Moran M S, Jackson R D, Raymond L H et al：通过 Landsat 热成像图与地面气象数据的组合制作地表能量平衡成分图．Remote Sensing of Environment, 1989, 30

(1) 净辐射通量密度(R_n)：

$$R_n = R_{S\downarrow} - R_{S\uparrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow}$$

式中，下标 S 和 L 分别表示太阳辐射(短波辐射)($0.15 \sim 4\mu m$)和长波辐射（$>4\mu m$)；箭头表示通量方向（↓为入射，↑为出射）；$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \sigma T_a^4$，$\varepsilon_a = 1.24(e_0 / T_a)^{1/7}$；$\sigma$是 Stefan-Boltzmann 常数；$T_a$是空气温度（K）；$e_0$是水蒸气压(mb)；$R_{L\uparrow} = \varepsilon_s \sigma T_s^4$，$\varepsilon_s$是表面发射率；$T_s$是表面温度。

(2) 瞬时潜热通量密度λE：

$$\lambda E = R_n - G - H$$

式中，G是土壤热通量密度；H是显热通量密度；$G / R_n = 0.583e^{-2.13ND}$，$ND$是归一化差植被指数；$H = \rho c_p(T_s - T_a) / r_a$，$\rho c_p$是体积热容量($J \cdot m^{-3} \cdot °C^{-1}$)，$r_a$是稳定性校正空气动力学阻力。

r_a有以下两种情况：

① 对稳定情形，有：

$$r_a = \{\ln[(z - d + z_0) / z_0] / k\}^2 \times (1 + 15Ri)(1 + 5Ri)^{1/2} / U$$

② 对不稳定情形，有：

$$r_a = \{\ln[(z - d + z_0) / z_0] / k\}^2 \times$$
$$\{1 - 15Ri/[1 + C(-Ri)^{1/2}]\}^{-1} / U$$

式中，g是重力加速度；Ri是 Richardson 数$[Ri = g(T_a - T_s)(z - d) / T_a U^2]$；$U$是风速；$z$是测量风速和温度的距离表面的高度；$d$是在高度上的位移；$z_0$是粗糙长度；$k$是 von Karman 常数，即$C = 75k^2[(z - d + z_0) / z_0]^{1/2} \times \{\ln[(z - d + z_0) / z_0]\}^2$。

遮蔽区域内任意点的遮蔽角和方位角的计算公式

林少君：复杂遮蔽区域日照条件的研究．地理研究，1989，8(1)

(1) 当$W_d \leqslant 180°$时：

$$\begin{cases} W_{di} = W_d - \eta_i + 180° & (W_d < W_i < W_d + 180°) \\ W_{di} = W_d + \eta_i + 180° & (W_i \leqslant W_d \text{或} W_i \geqslant W_d + 180°) \end{cases}$$

(2) 当$W_d > 180°$时：

$$\begin{cases} W_{di} = W_d - \eta_i + 180° & (W_d - 180° \leqslant W_i \leqslant W_d) \\ W_{di} = W_d - \eta_i + 180° & (W_i < W_d - 180° \text{或} W_i > W_d) \end{cases}$$

式中，W_{di}为遮蔽物i相对于任意点D的方位角，若$W_{di} > 360°$，则$W_{di} = W_{di} - 360°$，若$W_{di} < 0°$，则$W_{di} = W_{di} - 360°$；$\lambda_{di} = \arctan\left(\frac{H_i + h_A - \Delta h}{Y_i}\right)$，$\lambda_{di}$为遮蔽物$i$对$D$点的遮蔽角；$\Delta h$为$D$点和主测点$A$地面的高度差。

(3) 太阳视运动轨迹：

$$\begin{cases} \sin h_0 = \sin\varphi \sin\theta + \cos\varphi \cos\theta \cos\omega \\ \cos A = \sin h_0 \sin\varphi - (\sin\theta / \cos h_0) \cdot \cos\varphi \end{cases}$$

式中，h_θ 为太阳高度角；φ 为地理纬度；θ 为太阳赤纬；ω 为时角；A 为太阳方位角，从正南起按顺时针方向计算。

多焦点投影公式

吴忠性：多焦点地图投影．地理学报，1989, 44(1)

$$x' = x + \sum_{i=1}^{n} \frac{A_i(x - X_i)}{1 + C_i R_i^2}$$

$$y' = y + \sum_{i=1}^{n} \frac{A_i(y - Y_i)}{1 + C_i R_i^2}$$

式中，$R_i = \sqrt{(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2}$；$A_i = a_i / b_i$；$C_i = c_i / b_i$；$(X_i, Y_i)$ 为 n 个已知焦点的坐标值 $(i = 1,2,\cdots,n)$；a_i、b_i，c_i 为经验函数；(x, y) 为原来地图中 p 点的坐标；(x', y') 为 P' 点新的直角坐标。

纠正的基本原理

孟波，毛赞猷：利用 WILD AVIOPLAN OR-1 对卫星图像进行几何处理．环境遥感，1989, 4(3)

(1)参数法：

$$\begin{cases} dx = A_0 + A_1 x + A_2 y + A_3 x^2 + A_4 xy + \\ \qquad A_5 y^2 + A_6 x^3 + A_7 x^2 y + A_8 xy^2 + A_9 y^3 \\ dy = B_0 + B_1 x + B_2 y + B_3 x^2 + B_4 xy + \\ \qquad B_5 y^2 + B_6 x^3 + B_7 x^2 y + B_8 xy^2 + B_9 y^3 \end{cases}$$

(2)非参数法：

$$\begin{cases} x = a_0 + a_1 P_1(\bar{x}) + a_2 P_1(\bar{y}) + \\ \qquad a_3 P_2(\bar{y}) + a_4 P_1(\bar{x}) P_1(\bar{y}) + a_5 P_2(\bar{y}) + \cdots \\ y = b_0 + b_1 P_1(\bar{x}) + b_2 P_1(\bar{y}) + b_3 P_2(\bar{y}) + \\ \qquad b_4 P_1(\bar{x}) P_1(\bar{y}) + b_5 P_2(\bar{y}) + \cdots \end{cases}$$

式中，$P_0(z) = 1$；$P_1(z) = z$；$\bar{x}, \bar{y}$ 为归化到 $[-1,1]$ 区间坐标值；$P_{k+1}(z) = \frac{2k+1}{k+1} z \cdot P_k(z) - \frac{k}{k+1} P_{k-1}(z)$。

两种自然现象之间的重合度计算公式

詹小龙，廖克：自然系列地图轮廓界线统一协调问题．地理学报，1989, 44(4)

$$K_{AB} = \frac{H(A) + H(B) - H(AB)}{H(AB)} \times \frac{H(AB)_{\min}}{H(A)_{\max} + H(B)_{\max} - H(AB)_{\min}}$$

式中，W_{ai}、W_{bj} 分别为 A、B 两种自然现象各个类型出现的概率；W_{abij} 为 A，B 重合面积比；m, n 分别为 A, B 两现象的分类数目；H 为各图的信息量；

$$H(A) = -\sum_{i=1}^{m} W_{ai} \cdot \lg_2 W_{ai}\ ; \quad H_{\max}(B) = \lg_2 n\ ;$$

$$H(B) = -\sum_{j=1}^{m} W_{bj} \cdot \lg_2 W_{bj}\ ; \quad H_{\max}(A) = \lg_2 m\ ;$$

$$H(AB) = -\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} W_{abij} \cdot \lg_2 W_{abij}\ ;$$

$$H_{\min}(AB) \approx -\left(\frac{n}{m} \lg_2 \frac{1}{m} + \frac{m-n}{m} \cdot \lg_2 \frac{m-n}{mn} \right)。$$

半变图的计算公式

Cohen W B, Spies T A, Bradshaw G A：用于针叶林冠层结构分析的数字图像的半变图．Remote Sensing of Environment, 1990, 34

半变图 $\gamma(h)$ 是一组给定的数据的空间变化的图形表示，其计算式为：

$$\gamma(h) = \frac{1}{2(n-h)} \sum_{i=1}^{n-h} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

式中，h 是 γ 量度的延迟(或距离)；n 是估计 $\gamma(h)$ 时所用的观测值的数目；Z 是在空间位置 x_i 处所关心的变量的值；$Z(x_i + h)$ 是与 x_i 距离 h 处的变量的值。

空间实验室测量相机像片的几何特性及其精度分析模型

徐庆庆，朱重光，刘纪远等：空间实验室图像的制图能力分析及其地学应用——以西藏日喀则地区和珠峰地区的试验为例．环境遥感，1990, 5(4)

(1) 图像的球面性——像点位移模型：

$$\delta_c = -r \cdot H / 2Rf^2$$

(2) 地形高差引起的投影差值 δ_h 模型：

$$\delta_h = (1 + H/R) \cdot \frac{r \cdot h}{H}$$

(3) 大气折射对像点位移的影响——位移 Δr 模型：

$$\Delta r = E \cdot \gamma + \frac{E}{f^2} \gamma^3$$

式中，$E=\frac{n-n_H}{n+n_H}$；Δr 的值将随 γ 值增加而迅速增大

(4) 平面、高程精度模型：

$$\Delta x(或\Delta y)=\frac{H}{f}\cdot d_p$$

$$\Delta Z=\frac{H}{b}\cdot d_p$$

式中，H 为航高；f 为摄影机焦距；b 为立体像对基线长度；d_p 为视差量测误差。

加密点预期精度估算公式

钱育华，翁祖平，许楷成：应用航空摄影资料编制高山峡谷地区正摄影像图　环境遥感，1993，8(1)

平面：

$$M_s=\pm0.28\cdot K\cdot m_q\cdot\sqrt{n_0^3+2n_0+46}$$

高程：

$$M_h=\pm0.088\cdot\frac{H}{b_0}\cdot m_q\cdot\sqrt{n_0^3+22n_0+83}$$

式中，M_s(mm) 和 M_h(m) 分别为平面位置和高程位置加密误差；K 为像片比例尺与成图比例尺分母之比；n_0 为加密的基线数；b_0 为航片基线长；H 为相对航高；m_q 为上下视差观测中误差。

图像处理的样条函数

Ranson K J, Sun G：利用时变的多频谱及多偏振方向的 SAR 图像对北部森林的分类　Remote Sensing of Environment, 1994, 47

在分类前，应用了一个简单的，基于空间自相关的样条函数来除掉图像中的斑点，假设像素 k 的值受其他像素的影响是线性的，则：

$$x_k=\rho\sum_i w_{k,i}x_i+u_k$$

式中，w_k 是权重；u_k 是高斯分布的噪音项；ρ 是邻近像素间的自相关的强度的常数；如果用矩阵 X 表示一个图像，则矩阵定义为 $X=\rho WX+U$，解出 X 得有 $X=(I-\rho W)^{-1}U$。

地理背景底图制作及等值线图绘制的相关模型

汪莉英，刘宝元：微机绘制等值线图在土壤侵蚀研究中的应用　水土保持通报，1993，13(4)

(1) 地理坐标与平面直角坐标的转换模型：

$$\begin{cases}x=r\sin d\\ y=r_s-r\cos d\end{cases}$$

$$\begin{cases}R=\frac{A\cos P}{\sqrt{1-e^2\sin^2P}}\\ U=\tan\left(45^\circ+\frac{P}{2}\right)\left(\frac{1-e\sin P}{1+e\sin P}\right)^{\frac{e}{2}}\\ a=\frac{\ln R_1-\ln R_2}{\ln U_2-\ln U_1}\\ k=\frac{R_1U_1^a}{a}=\frac{R_2U_2^a}{a}\\ r_s=\frac{k}{U_s^a}\\ r=\frac{k}{U^a}=\frac{k}{\left[\tan\left(45^\circ+\frac{P}{2}\right)\left(\frac{1-e\sin P}{1+e\sin P}\right)^{\frac{e}{2}}\right]^a}\\ d=a(L-L_c)\end{cases}$$

式中，A 为地球半径，A=6378245；P 为纬度；L 为经度；P_1 和 P_2 为标准纬线纬度；P_s 为最南一条纬线的纬度；L_c 为中央经线的经度；e 为椭圆的第一偏心率，e=0.006 693 421 6；r 为纬线圆弧半径；r_s 为最南一条纬线圆弧半径；x 和 y 为平面直角坐标。

(2) 等值线图的绘制的距离加权模型：

$$Z=\frac{\sum_{i=1}^{n}\frac{Z_i}{(d_i)^a}}{\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{(d_i)^a}}$$

式中，Z 为所求点的值；Z_i 为临近点的实测值；d_i 为临近点到所求点的距离；a 为距离权重系数；n 为要求的点数。

基于冠层反射模型的森林植被图制作

Woodcock C E, Collins J B, Gopal S et al：基于冠层反射模型利用 Landsat TM 图像制作森林植被图　Remote Sensing of Environment, 1994, 50

传感器接收到的信号被模拟为从树冠及其阴影以及在传感器视角中的背景的反射光的组合，

$$S=K_gG+K_cC+K_tT+K_zZ$$

式中，S 是像元的明亮度的值；K_g、K_c、K_t 和 K_z 分别代表阳光照射的背景、阳光照射的树冠、背阴的树冠及背阴的背景的面积比例；G、C、T 和 Z 是相应

成分的谱信号。

Li 和 Strahler (1985) 证明了如果树木在群丛中是随机分布(泊松分布)的，而且树冠大小分布是与树的密度无关的，则：

$$R^2 \approx V_m/(1+W)M$$

式中，R^2是树冠半径的均方值；M 和V_m分别是树的参数m的均值和方差；W是树冠半径的平方值r^2的变分系数。

图形梯尺公式

初世强，刘岳：面向对象的电子地图创作模型——国家经济地图集(电子版)软件设计研究，地理学报，1996，51(1)

$$y = k(x - x_0)^{\frac{1}{n}} + b$$

式中，x为制图指标数据；x_0为x的偏移量；y为相应于x的地图符号尺寸；n表示目标地图符号中用作表示制图指标的维数；k为系数；b是一个经验调整参数。

图斑取舍方法

齐清文，刘岳：非连续分布面状地理现象的图形自动概括方法，地理研究，1996，15(1)

(1) 定额选取模型：

$$G_t = G_a\sqrt{\frac{M_a}{M_t}}^2$$

式中，$G_a=\sum_{i=1}^{n}G_i$，$G_a=\sum_{i=1}^{m}G_j$；G_a，G_t分别为原图、新图上的图斑总面积；M_a，M_t分别为原图、新图的比例尺分母；G_i，G_j分别为原图、新图上单个图斑的面积。

(2) 位置评分模型：

1) 计算阈值：

$$S = 2\cdot\sqrt{\frac{M_a}{M_t}}$$

2) 计算某图斑到距其最近的图斑的距离d：

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_l)^2 + (y_i - y_l)^2}$$

3) 判断并计算赋值B_i：

$$B_i = \begin{cases}\sqrt{\dfrac{S}{d_i}} & (d_i \leqslant S)\\ \sqrt{\dfrac{d_i}{S}} & (d_i > S)\end{cases}$$

4) 归算处理和计算综合评分：

$$F_i = \frac{C_i}{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}C_i^2}} + \frac{A_i}{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}A_i^2}} + \frac{B_i}{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}B_i^2}}$$

式中，F_i为综合评分值。

利用 SIR-C/X-SAR 图像描述北部森林的碳特性

Bergen K M. Dobson M C, Pierce L et al：利用 SIR-C/X-SAR 图像描述北部森林的碳特性。Remote Sensing of Environment, 1998, 63

(1) 基于应用 SAR 推导出的地面上生物量，地面下生物量被投影到图中一个个像元上：

$$W_{bgi} = f(W_{agi}, C_i)$$

式中，W_{bg}是地面下生物量，W_{ag}是地面上生物量，C是类别，i表示第i个森林位置。

(2) 另一个生态学上有意义的图像是根与嫩芽的比值(R/S)：

$$R/S_i = W_{bgi}/W_{agi}$$

绝对A_{NPP}的图像可用下面的简单模型得到：

$$A_{NPP_i} = f(W_{agi}, C_i)$$

式中，A_{NPP}是地面上净初级生产力。

制图准确度评估模型

Edwards T C, Jr. Moisen G G et al：对遥感得到的生态区域尺度覆盖图的制图准确度的评估. Remote Sensing of Environment, 1998, 63

假设在一个地层里有N个簇，每个簇又由M个样本单元构成，第i簇中第j个样本单元的观测值记为y_{ij}，当样本单元分类正确时，其值取为 1，否则取为 0。令P表示正确分类的样本单元的实际比例，则可定义簇内相关系数ρ为：

$$\rho = \frac{2\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}\sum_{k=j+1}^{M}(y_{ij}-P)(y_{ik}-P)}{(M-1)(NM-1)\sigma^2}$$

式中，$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}(y_{ij}-P)^2}{NM-1}$，令 p 表示正确分类的样本单元的采样比例，而 $V_{srs}(p)$ 和 $V_{clus}(p)$ 分别表示简单随机采样(SRS)和簇采样法下 p 的方差，则簇采样法对 SRS 的相对效率为 $\frac{V_{srs}(p)}{V_{clus}(p)} = \frac{1}{1+(M-1)\rho}$。

雷达图像大范围校正模型

Chorowicz J, Rouis T, Rudant J P et al: 应用语法分析的雷达图像地貌模式计算机辅助识别 Remote Sensing of Environment, 1998, 64

机载雷达一般需要进行大范围校正。通过对图像进行校正而得到平均斜率为 0 的行扫描剖面线，其公式如下：

$$p'(i) = p(i) + Mg \cdot i$$

式中，Mg 是从行扫描得到的图像的平均辐射斜率；i 是像元在剖面线上的位置；$p(i)$ 是像元 i 在剖面线上的初始值；$p'(i)$ 是像元 i 在剖面线上的最终值。

地理信息系统可视化专题制图要素分级方法

党安荣：地理信息系统可视化专题制图要素分级探讨. 地理学报, 1998, 53(增刊)

(1) 计算地图信息量的申农公式：

$$I = -\sum_{i=1}^{n} P_i \log_2 P_i$$

式中，I 为地图信息量；P_i 为制图要素 i 占整个制图要素的比例。

(2) 制图要素的"多样性"：

$$I = \log_2 \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{l_i}\sum_{k=1}^{m_j}\sum_{\Delta=1}^{r_k}\gamma_{i,j,k,\Delta}$$

式中，i、j、k 和 Δ 为各类制图要素；n、l_i、m_j 和 r_k 为各类制图要素的多种特征数；$\gamma_{i,j,k,\Delta}$ 为各类制图要素以及制图要素的多种特征占整个制图要素的比例。

(3) 综合特征值量测法：

$$I = \mu\prod_{i=1}^{\alpha}\log_2(\omega_i + 1)$$

式中，μ 为制图要素的特征值参数(其数值计算随点状符号、线状符号及面状符号有所区别)；α 为制图要素的特征数值(通常包括要素的个数、分级、复杂程度和重要程度四个特征)；ω_i 为制图要素第 i 分级或第 i 类别出现的频率或频数

(4) 制图要素分级信息量：

$$I = \gamma \cdot f(k) \cdot \sum_{j=1}^{k}\log_2(S_j + 1)$$

式中，$\gamma = 15\sqrt{(1/\log_2 M)}$ 为制图比例尺加权因子，M 为专题地图比例尺分母；$f(k) = \begin{cases}\log_2(1+k) & (k \leqslant N)\\ \log_2(1+1/k) & (k > N)\end{cases}$ 为要素分级数加权因子，k 为制图要素实际分级数，N 为要素最大理论分级数；S_j 为第 j 级制图要素面积。

(5) 任意数列分级法：

$$A_i = \left[L^x + \frac{H^x - L^x}{k}(-1)\right]^{\frac{1}{x}}$$

式中，A_i 为制图要素分级界限；$\chi \in \{(\beta,1],[1,\gamma)\}$，$(i = 1,2,3,\cdots,k+1)$；$L$ 和 H 分别为制图要素统计数据的最小值和最大值；χ 为待定分级参数。

(6) 算术级数分级法：

$$\begin{cases}L + B_1X + B_2X + \cdots + B_kX = H\\ B_j = 1 + (j-1)d\end{cases}$$

式中，B_j 为制图要素分级间隔 $(j = 1,2,3,\cdots,k)$；$d \in \left\{\left(-\frac{1}{k-1},0\right),\left(0,\frac{ak-1}{k-1}\right)\right\}$，$(1 < a < k)$，$d$ 为待定分级参数。

(7) 几何级数分级法：

$$\begin{cases}L + B_1X + B_2X + \cdots + B_kX = H\\ B_j = \gamma^{j-1}\end{cases}$$

式中，$d \in \left\{\left(0,(ak)^{\frac{1}{k-1}}\right)\right\}$，$(1 < a < k)$；$\gamma$ 为待定分级参数。

(8) 任意级数分级法：

$$\begin{cases}L + B_1X + B_2X + \cdots + B_kX = H\\ B_j = \left[1 + \frac{B_kX - 1}{k-1}(j-1)\right]^{\frac{1}{X}}\end{cases}$$

式中，$X \in (\alpha,\beta)$，$(X \neq 0)$；$B_k \in (0,ak)$，$B_k \neq 1$，B_k 为待定分级参数。

粗略分辨率和精细分辨率数据的组合使用

Cihlar J, Latifovic R, Chen J et al: 选择代表性的高分辨率样本图像进行土地覆盖研究之二——应用于估计土地覆盖构成. Remote Sensing of Environment, 2000, 72

$$\hat{p}_i=\sum_{j=1}^{k}\frac{(f_j+n_{.j})}{N}\cdot\frac{n_{ij}}{n_{.j}}$$

式中，$\hat{p}_i$ 是单一覆盖类型所占比例的估计值的矢量；n 是参考样本中单元的数目(即 TM 的像元数)；N 是参考及分类数据集合中单元的组合数(即 AVHRR 与 TM 像元数的和)；f 是 $(N-n)$ 个元素在每个类型中的数目的列矢量(即相应每个覆盖类型 AVHRR 像元的数目)；下标 i 表示参考数据集(TM 数据，行)；下标 j 表示分类数据集(AVHRR 数据，列)；k 是覆盖类型数，是对所有 i 求和而得。

此方程基于 AVHRR 区域图与 TM 图的组合给出了区域中每种土地覆盖类型的比例的估计值。

评价植被生态利用分类图的定量模糊方法

Townsend P A：评价植被的生态利用分类图的定量模糊方法. Remote Sensing of Environment, 2000, 72

(1) 相似度指数(SI)是 Bray 和 Curtis (1957)应用的生态群落系数的修正形式，生态群落的 Bray-Curtis 系数是一个相异指数，表示为：

$$CC_{ir}=\frac{\sum_k|IV_{ki}-IV_{kr}|}{\sum_k|IV_{ki}+IV_{kr}|}$$

式中，CC_{ir} 是图中像元 i 与图的类别 r 间的差异的量度值；IV_{ki} 是像元 i 中第 k 种物种的丰度(IV)，IV_{kr} 是这个物种在图的类别 r 中的平均重要度，如此每个像元 i 都与每个参考类别 r 进行比较。

(2) 生态群落系数通过下式转换到 SI：

$$SI_{ir}=1-CC_{ir}$$

分类器及其组合模型

Steele B M：组合多重分类器——利用空间及遥感信息进行覆盖类型作图. Remote Sensing of Environment, 2000, 74

(1) 线性判别式分类器：

从点 x_0 到组 G_h 的 Mahalanobis 距离定义为：

$$m_h(t_0)=(t_0-\bar{t}_h)'\hat{E}^{-1}(t_0-\bar{t}_h)$$

式中，$\bar{t}_h$ 定义为组 h 的协变量矢量的多变量样本平均；$\hat{E}$ 是汇集的样本的方差-协方差矩阵；u' 定义为矢量 u 的转置；属于组 G_h 的后验概率可用下式估计：

$$p_h(x_0)=\frac{\exp[-m_h(t_0)/2]}{\sum_{j=1}^{g}\exp[-m_j(t_0)/2]}$$

(2) 空间分类器：

令 $z_0=(z_{0,1},z_{0,2})$ 定义了 $x_0\in G_h$ 的位置坐标，而 $z_{0,h}$ 定义了在 G_h 中的所有训练观测值中与 x_0 的空间距离最近的观测值的位置坐标，然后定义观测值 x_0 到组 G_h 的距离为 z_0 与 $z_{0,h}$ 之间的空间距离，记为 $d_h(z_0)$。令 x_k 为属于 G_h 的第 k 个训练观测值，而 $d_h(z_k)$ 为 x_k 到 G_h 的距离。G_h 内的观测值到组的距离集合定义为 $\boldsymbol{D}_h=\{d_h(z_k)\mid k=1,\cdots,n_h\}$，这里 n_h 是属于 G_h 的训练观测值的数目。

给定位置 z_0 处的土地覆盖类型为 G_h，观测值到组的距离大于 $d_h(z_0)$ 的概率为 $P[d_h(Z)>d_h(z_0)\mid y=h]$，这里 Z 定义为从集合 $P\cap G_h$ 中随机抽取的多边形的位置，可利用 $\boldsymbol{D}_h$ 中 $d_h(z_0)$ 的顺序得到 $P[d_h(Z)>d_h(z_0)\mid y=h]$ 的估计值：

$$\hat{P}[d_h(Z)>d_h(z_0)\mid y=h]=\begin{cases}\dfrac{{}^{\#}[d_h(z_k)\in \boldsymbol{D}_h\ \ d_h(z_k)>d_h(z_0)]-0.5}{n_h} & (d_h(z_0)<\max \boldsymbol{D}_h)\\ 0.5/\max\{n_1,\cdots,n_g\} & (d_h(z_0)>\max \boldsymbol{D}_h)\end{cases}$$

式中，${}^{\#}A$ 表示集合中 A 的元素数目。

(3) 组 G_h 的空间隶属概率定义为：

$$p_n(x_0)=\frac{\hat{P}[d_h(Z)>d_h(z_0)\mid y=h]}{\sum_{j=1}^{g}\hat{P}[d_j(Z)>d_j(z_0)\mid y=j]}$$

式中，如果对每一个 $j=1,\cdots,g$，有 $p_h(x_0)>p_j(x_0)$，则空间分类规则把 x_0 归类到 G_h。

利用相关松弛法寻找 GOP

毛志华，黄海清，朱乾坤等：SeaWiFS 与 AVHRR 资料自动几何配准. 遥感学报，2000，4(3)

(1) 一致性强度(C)模型：

$$C=\exp(-d_1/d_2)\cos\theta\left[1-\frac{|l_1|-|l_2|}{\max(|l_1|\cdot|l_2|)}\right]$$

式中，l_1 和 l_2 为两个向量；d_1 为两个向量起点间距离，d_0 为调节参数；θ 为两个向量的夹角。

(2) 一个向量从周围所有向量得到的支持强度(S)模型：

$$S_{iK}^{n}-\sum\sum C(i,K,h,j)P_{hj}^{n}$$

式中，$C(i,K,h,j)$ 是第 i 个相关系数矩阵中第 K 个向量与第 h 个相关系数矩阵中第 j 个向量的一致性强度；P_{hj}^n 是第 n 次循环时第 h 个相关系数矩阵中第 j 个向量的概率值。

(3) 由支持强度修正向量的概率模型：

$$P_{iK}^{n+1} = P_{iK}^n(1+S_{ik}^n)/\sum_r[P_{ir}^n(1+S_{ir}^n)]$$

稳态迁移因子模型

Perk M V D, Burema J R, Burrough P A et al: 基于 GIS 估计切诺尔事故污染地区长寿命放射性铯随食物链迁移的环境决策支持系统. Int J Geographical Information Science, 2001, 15

(1) 放射性铯从土壤向食物产品的迁移可用下式计算：

$$Cs_F = Tag_t \times Cs_S \times 10^3$$

式中，Cs_F 是食物产品的入射性铯污染量($Bq \cdot kg^{-1}$)；Tag_t 是集中迁移因子($m^2 \cdot kg^{-1}$)；Cs_s 是土壤中放射性铯的污染量 ($kBq \cdot m^{-2}$)。

(2) 集中迁移因子随时间衰减可用半衰期来预测：

$$Tag_t = [A_1\exp(-k_1t) + A_2\exp(-k_2t)]Tag_0$$

式中，Tag_0 是在时刻 0 时的集中迁移因了；A_1 和 A_2 是经验参数；k_1 是快衰变部分的一阶衰变常数的经验值；k_2 是慢衰变部分的一阶衰变常数的经验值。

大气校正的时间内插模型

Schädlich S, Göttsche F M, Olesen F S: 陆地表面参数及大气对 METEOSAT 亮度温度的影响与利用时间及空间内插大气校正生成陆地表面温度图. Remote Sensing of Environment, 2001, 75

白天温度波动的时间内插方法为：将下面的模型对已进行云校准而没有进行大气校正的亮度温度 T [℃]数据进行拟合：

$$T(t) = T_0 + T_a \cdot \cos\left[\frac{\pi}{\omega}\cdot(t-t_m)\right] \quad (t < t_s)$$

$$T(t) = T_0 + T_a \cdot \cos\left[\frac{\pi}{\omega}\cdot(t_s-t_m)\right]\cdot\exp\left[\frac{-(t-t_s)}{k}\right] \quad (t > t_s)$$

式中，T_0 是前一天的残余温度；T_a 是白天温度的波动幅度；ω 是将余弦函数调整到 $\pm\pi/2$ 的宽度；t 是时间；t_m 是最高温度对应时间；t_s 是衰减函数的开始时间；k 是衰减常数。

第五章 地理信息系统

山地地形参数计算模式

李占清，翁笃鸣：一个计算山地地形参数的计算机模式 地理学报，1987，42(3)

(1) 山地局地平均坡向、坡度的计算模式：

$$\beta = \pi - \arctan\left(\frac{\partial H}{\partial x} \bigg/ \frac{\partial H}{\partial y}\right)$$

$$\alpha = \arctan\left[\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y}\right)^2\right]^{-1/2}$$

式中，β 为坡向(以正南为 0，沿顺时针方向为正)；α 为坡度；$H(x,y)$ 为山区拔海高度场，x 和 y 分别代表东西向和南北向坐标（x 坐标由西向东为正，y 坐标由北向南为正）。

(2) 山区地形遮蔽角的计算模式：

$$h_s(\varphi) = \arcsin\frac{-\cos(\beta-\varphi)}{[\cos^2\alpha + \cos^2(\beta-\varphi)]^{1/2}}$$

式中，$h_s(\varphi)$ 表示方位角为 φ 的方位上的自身遮蔽角。

多边形面积模型

周心铁：地理信息系统中由线段数字化记录重建多边形的方法，环境遥感，1988，3(1)

$$S = -\frac{1}{2}\left\{\begin{vmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \end{vmatrix} + \cdots + \begin{vmatrix} x_n & y_n \\ x_1 & y_1 \end{vmatrix}\right\}$$

其中，$x_1, y_1, \cdots, x_n, y_n$ 为多边形各线段数字化坐标记录，它们是多边形的各个顶点。

因子属性的敏感性分析公式

唐川，Jorg Grunert：滑坡灾害评价原理和方法研究，地理学报，1988，53(增刊)

$$PD_{mn} = DP_{mn}(L) / DP_m(G)$$

式中，P_{mn} 为因子 m 的某属性 n 的出现频率；对滑坡数据 $DP_{mn}(L) - P_{mn}(L)/P_m(L)$；对栅格数据 $DP_{mn}(G) = P_{nn}(G)/P_m(G)$。

地形描绘的数学方法

彭望：地形描绘方法在黄土丘陵沟壑地区的应用，环境遥感，1989，4(1)

(1) 三次多项式拟合模型：

$$f(x,y) = C_1 + C_2x + C_3y + C_4x^2 + C_5xy + C_6y^2 + C_7x^3 + C_8x^2y + C_9xy^2 + C_{10}y^3$$

(2) 具有最小残差平方和的拟合函数模型：

$$f(r,s) = \sum \alpha_{r,s}\, \phi_{r,s}$$

式中，$\alpha_{r,s}$ 为权重系数；$\phi_{r,s} = \cos(r\pi x/L) \otimes \cos(s\pi y/L)$ 为二维余弦函数。

(3) 地形信息的提取——函数 f 的梯度矢量 ∇f 的大小和方向模型：

$$|\nabla f| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{\partial f}{\partial x} \bigg/ \frac{\partial f}{\partial y}\right)$$

国土地形成像过程的数学模拟与几何失真恢复模型

郭兆曾，何志勤，李玲芝：国土地形成像过程的数学模拟与几何失真恢复，环境遥感，1989，4(3)

1. 模型建立

(1) 不包括高程的几何校正公式：

地面点的地心经纬度模型：

$$\begin{cases} \varphi_s' = \arcsin\dfrac{Z_{eG}}{C_e} \\ \lambda_s' = \arctan\dfrac{Y_{eG}}{X_{eG}} \quad \left(当 \dfrac{Y_{eG}}{X_{eG}} < 0 时，\lambda_s' = \lambda_s' + \pi\right) \end{cases}$$

目标点的地理纬度 φ 模型：

$$\varphi_{i+1} = \varphi_s' + \sin^{-1}\left(N_i e^2 \sin\varphi_i \cos\varphi_i / R\right)$$

式中，$e^2 = 0.006\,693\,421\,623$；$R = \sqrt{X_s^2 + Y_s^2 + Z_s^2}$；

$N_i = a_e / (1 - e^2 \sin^2 \varphi_i)^{\frac{1}{2}}$

(2) 包括高程的几何校正公式：

$$\begin{cases} x = x_0 + \dfrac{l^2 N}{2\rho''^2} \sin\varphi \cos\varphi + \\ \quad \dfrac{l^4 N}{24\rho''^4} \sin\varphi \cos^3\varphi (5 - t^2 + 9\eta^2) \\ y = \dfrac{lN}{\rho''} \cos\varphi + \dfrac{l^3 N}{6\rho''^3} \cos^3\varphi (1 - t^2 + \eta^2) + \\ \quad \dfrac{l^5 N}{120\rho''^5} \cos^5\varphi (5 - 18t^2 + t^4) \end{cases}$$

式中，$t = \tan\varphi$；$l = \lambda - \lambda_0$；$\eta = e'^2 \cos\varphi$；$e'^2 =$ 0.006 738 525 414 68；$\dfrac{1}{\rho''} = 48\,481.368\,1 \times 10^{-10}$；$x_0 = C(A\varphi - \frac{1}{2}B\sin 2\varphi + \frac{1}{4}C\sin 4\varphi - \frac{1}{6}D\sin 6\varphi + \frac{1}{8}E\sin 8\varphi)$；$C$ 及 $A \sim E$ 均为常数。

2. 残差的消除

(1) 平面拟和法(三次)：

$$\begin{cases} X = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 y^2 + \\ \quad a_6 x^3 + a_7 x^2 y + a_8 xy^2 + a_9 y^3 \\ Y = b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 x^2 + b_4 xy + b_5 y^2 + \\ \quad b_6 x^3 + b_7 x^2 y + b_8 xy^2 + b_9 y^3 \end{cases}$$

(2) 样条函数方法的基本公式：

$$\begin{cases} X = \varphi_i X_i + \varphi_j X_j + \varphi_m X_m \\ Y = \varphi_i Y_i + \varphi_j Y_j + \varphi_m Y_m \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_m \ \mathrm{sign}(y_p - A_{ij} x_p - B_{ij}) \geqslant 0 \\ P_j \ \mathrm{sign}(y_p - A_{mi} x_p - B_{mi}) \geqslant 0 \\ P_i \ \mathrm{sign}(y_p - A_{jm} x_p - B_{jm}) \geqslant 0 \end{cases}$$

3. 数字高程模型

$$h_p(x_p, y_p) = \varphi_i h_i + \varphi_j h_j + \varphi_m h_m$$

式中，h_i、h_j 和 h_m 为三角形顶点处的地面高程。

MLREIS 土地资源评价模型

傅炜：微机土地资源评价信息系统的建立及其应用研究．环境遥感，1989，4(3)

1. 土地资源适宜性评价的 Fuzzy 聚焦模式

(1) Fuzzy 相似关系矩阵 $\underset{\sim}{R}$ 模型：

$$\underset{\sim}{R} = (\gamma_{ij})_{n\times n}$$

$$\gamma_{ij} = \begin{cases} 1 & (i = j) \\ \dfrac{1}{m}\sum_{t=1}^{m} \alpha_t u_{ij}^{(t)} & (i \neq j) \end{cases}$$

式中，m 为样本数；α_t 为权重分配向量，$\alpha_t \in [0,1]$，$\sum_{t=1}^{m} \alpha_t = 1$；$u_{ij}^{(t)}$ 为隶属函数。

(2) Fuzzy 聚类最佳分类水平 λ 的选定——统计量 F 模型：

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{n} n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2 / (n-1)}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i) / (N - n)}$$

式中，n 为类数；N 为样本总数；n_i 为第 i 类的样本数；$\bar{x}_i$ 为第 i 类样本的平均值；$\bar{x}$ 为总体样本的平均值；x_{ij} 为第 i 类中第 j 个样本的值。

2. 土地资源质量评价的 Fuzzy 模型识别模式

(1) 确定矩阵 A：

$$A = \begin{vmatrix} \alpha_1 P_1 & \alpha_2 P_1 & \cdots & \alpha_7 P_1 \\ \alpha_1 P_2 & \alpha_2 P_2 & \cdots & \alpha_7 P_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \alpha_1 P_6 & \alpha_2 P_6 & \cdots & \alpha_7 P_6 \end{vmatrix}$$

式中，P_i 为参考对象的隶属度；α_t 为评价因素的权重向量。

(2) 评价对象质量指数的计算和质量级别的确定：

评价对象 $W \in U$ 对 P_i 相容度模型为：

$$\Pi_W(W_i) = 1 - |u_N(W) - P_i|$$

$$i = 1, 2, \cdots, 6$$

生产潜力模型

冷疏影：地理信息系统支持下的中国农业生产潜力研究．自然资源学报，1992，7(1)

$$YQ_c = \sum_{i=1}^{12} Q_A (a + bn/N)$$

式中，YQ_c 为到达地面的太阳年总辐射值，$\mathrm{J \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}}$；$a, b$ 分别表示散射辐射和直接辐射对总辐射的影响，它随季节变化；n/N 为日照百分率(%)。

$$Y_{GHE} = 0.0146YQ_c$$

式中，Y_{GHE} 为年光合潜力($kg \cdot hm^{-2}$)；0.0146 为由总辐射值($J \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)转换成光合潜力($kg \cdot hm^{-2}$)干物质的系数。

$$C_t = N/365$$

式中，C_t 为温度有效系数；N 为无霜期。

$$Y_{GWEN} = C_t \cdot Y_{GHE}$$

式中，Y_{GWEN} 为光温潜力年值($kg \cdot hm^{-2}$)。

$$C_w = P/E_0$$

式中，C_w 为水分有效系数；P 为月降水量(mm)；E_0 为月蒸发力(mm)。

$$Y_{GWS} = C_w \cdot Y_{GWEN}$$

式中，Y_{GWS} 为气候-生物潜力年值($kg^{-2} \cdot hm^{-2}$)。

$$Y_{PP} = C_s \cdot Y_{GWS}$$

式中，Y_{PP} 为农业生产潜力年值($kg \cdot hm^{-2}$)；C_s 为土壤有效系数。

卫星遥感数据景的地理坐标工程计算公式

张建国：卫星遥感数据景的地理坐标工程计算。环境遥感，1992，7(4)

(1) 视线向量 VUV 变换：

$$V = M_0 \ V_0$$

式中，M_0 为可旋转矩阵。

(2) 卫星位置计算：

$$X = \sum_{j=1,8} X_j \frac{\prod_{i \neq j}(t - t_i)}{\prod_{i \neq j}(t_j - t_i)}$$

(3) 地面点的计算——对应的地面经纬度 λ, φ：

$$\lambda = \arctan \frac{R_y}{R_x},$$

$$\varphi = \arctan \frac{R_z \ \sin\lambda}{R_y \times 0.993\,305\,619\,977\,1}$$

GIS 支持下坡面太阳辐射的计算公式

黄雪樵：地理信息系统支持下的坡面太阳辐射计算。地理研究，1992，11(4)

(1) 坡面直接辐射影响函数：

$$f_s = K(T) \cdot Q_s$$

式中，$K(T) = [U\sin\delta\ (\omega_2 - \omega_1) + V\cos\delta\ (\sin\omega_2 - \sin\omega_1) - W\cos\delta\ (\cos\omega_2 - \cos\omega_1)]/[2(\omega_0 \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \sin\omega_0)]$。

$$U = \sin\phi\cos\alpha - \cos\phi\sin\alpha\cos\beta$$

$$V = \cos\phi\cos\alpha + \sin\phi\sin\alpha\cos\beta$$

$$W = \sin\alpha\sin\beta$$

$$\omega_0 = \cos^{-1}(-\tan\phi\tan\delta)$$

式中，Q_s 为水平面直接辐射；α 为坡度；β 为坡向；ϕ 为纬度；δ 为太阳赤纬。

(2) 坡面散射辐射计算公式

$$Q_d' = Q_d\cos^2(\alpha/2) + F(n) \cdot A_D(h,\alpha) \cdot \cos\beta$$

式中，Q_d' 为坡面散射辐射；Q_d 为水平面散射辐射；$F(n) = 1 - (0.08n_t) + (0.02n_L)$，$n_t$ 和 n_L 分别为计算时期平均总云量和平均低云量；$A_D(h,\ \alpha) = 35.1\cos 1.09h\ \sin 1.42\alpha$，$h = 90° - \phi + \delta$ 为平均正午平太阳高度角。

定级信息系统的空间分析模型

黄杏元，高文，徐寿成：地理信息系统支持的城市土地定级方法研究。环境遥感，1993，8(4)

(1) 空间数据离散化算法模型：

$$\begin{cases} y = y_0 \\ (y - y_1)/(x - x_1) = (y_2 - y_1)/(x_2 - x_1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} I = y\text{div}D + 1 \\ x_i\text{div}D + 1 < J \leqslant x_{i+1}\text{div}D + 1 \end{cases}$$

式中，y_0 为行中心的纵坐标值；(x_1, y_1)，(x_2, y_2) 为弧段相邻节点的坐标值；I 为行号；J 为列号；D 为栅格单元边长；div 为整除运算符。

(2) 空间内插分析算法模型：

$$\sum_{i=1}^{N} Q_i^2 = \sum_{i=1}^{N} W(d_i)[f(x_i, y_i) - z_i]^2$$

$$= \varphi(a_0, a_1, \cdots, a_5) = \min$$

(3) 数字地形分析算法模型：

坡度：$SP = \arctan[\cos(z \cdot \boldsymbol{n})/(|z| \cdot |\boldsymbol{n}|)]$

平均高程：$AH = (z_{i,j} + z_{i,j-1} + z_{i+1,j} + z_{i+1,j+1})/4$

(4) 叠置分析算法模型：

$$P = W_1F_1 + W_2F_2$$

VI 与其他环境参数的关系模型

Hastings D A, Di L: 应用全球变化数据库基于 GIS 建立全球变化模型 ----Ⅰ.基于 GIS 建模. Remote Sensing of Environment, 1994, 9

(1) 特定时间(t)的 VI 可通过下(1)式近似预测：

$$VI(t) = A[\text{气候子模型}] + C$$

式中，A[气候子模型]=A_1[降雨量(T)]+A_2[温度(T)]+A_3[日照数(T)]+A_4，A，C，A_1，A_2，A_3和A_4是相应组分的系；T 表示在时刻t前某种组分在一段时间内的积累效应。

(2) Di 等(1994)通过把 VI 表示为降水的函数模拟植被对降水事件的反应：

$$VI(j) = C_0 + \sum_{i=n(j)}^{-1} W(i,j) \cdot Pe(j+i)$$

式中，i[取值范围从 $n(j)$ 到 -1]是在 Julian 时间前的天数，j 和 $Pe(j+i)$ 是儒略日 $(j+i)$ 的有效降雨量，它的范围在 0 到 1 之间；$n(j)$ 在总量上仅仅是T_j函数的表示之一，常常有效用来研究等高线间隔之间降雨事件持续的可能性；C_0 是等高线间隔 VI 的背景值；$W(i,j)$ 描述的是植被消耗水的有效性。

(3) 有效降雨量是降雨总量在最近$(j-i)$天和以前降雨分布的一个函数：

$$Pe(j+i) = \frac{\{1-\exp[-\alpha \cdot p(j+i)]\}}{\{1+\exp[-\alpha \cdot p(j+i)]\}}$$

式中，$p(j+i) = 2.0 \times P(j-i)/[1.0+\exp(\beta \cdot P_m)]$；$P_m$ 是 m-day 在儒略日 $(j+i)$ 以前聚积的降雨；$Pe(j+i)$ 是在儒略日 $(j+i)$ 的降雨总量；α 与 β 代表的是与土壤性质(如田间生产量)有可能相关的常量。

GIS 支持下森林火场蔓延的空间模拟模型

朱启疆，高峰，张振威：GIS 支持下森林火场蔓延的空间模拟．环境遥感，1995，10(2)

(1) 能量平衡的 Rothermel 模型：

$$V_\theta = \frac{V_{\text{base}}}{1-\left(1-\dfrac{V_{\text{base}}}{V_{\max}}\right)\cos\theta}$$

$$V_{\max} = V_{\text{base}}(1+\Phi_w+\Phi_s)$$

$$V_{\text{base}} = \frac{I_R\ \xi}{\rho_b\ \varepsilon\ Q_{ig}}$$

式中，V_θ 为任意 θ 方向上的火场蔓延速度；$V_{\max}$、V_{base} 分别为火场蔓延最大速度和不受风速与坡度影响的火场蔓延速度；Φ_w 为风速对火场蔓延速度的影响(顺风方向)；Φ_s 为坡度对火场蔓延速度的影响(上坡方向)；I_R 为火焰区反应强度；ξ 为林火蔓延率；ρ_b 为可燃物的体密度；ε 为有效热系数；Q_{ig} 为点燃单位质量的可燃物所需的热量。

(2) 像元起火概率 P_{ij} 模型：

$$P_{ij} = \left(\sum_{k=1}^{n} P_{ijk}\ W_k\right) P_{ijh}$$

式中，(i,j)为像元所在的位置；P_{ijk} 为各因子燃烧概率；P_{ijh} 为阻止火场扩散因素；W_k 为因素给定的权重。

分形内插与 DELAUNAY 三角网结合的可视化数据模型

向阳：分形内插与 DELAUNAY 三角网结合的可视化数据模型．环境遥感，1995，10(3)

(1) 分形细化模型：

$$g_{\text{mid}} = [dV_1 + (1-d)V_2] + G\left[0, \left(\frac{1}{2}\right)^{-k} \sigma\right]$$

式中，g_{mid} 为三角形边中点的内插值；h 为分维数对应的自相似参数(h=3- D)；σ 为方差参数；$G(\mu,\sigma)$ 为 μ 均值 σ 方差的随机变量函数。

(2) 三维地形的可视化模型：

$$I = I_a + I_d + I_s$$

$$\begin{cases} I_a = B\ R \\ I_d = P\ (\boldsymbol{l} \cdot \boldsymbol{n})\ R \\ I_s = P\ W\ (\boldsymbol{n} \cdot \boldsymbol{r}) \end{cases}$$

式中，I 为投影点的灰度值；I_a、I_d 和 I_s 分别为环境光强、漫反射光强和镜面反射光强；B 为环境辐射光强；R 为物体反射率；P 为点光源光强；W 为镜面反射系数；$\boldsymbol{l}$ 为指向光源的单位向量；$\boldsymbol{n}$ 为物体表面的单位法矢；$\boldsymbol{r} = 2(\boldsymbol{n} \cdot \boldsymbol{l}) \cdot \boldsymbol{r} - \boldsymbol{l}$ 为中间向量。

空间数据的三角形四叉树结构

杨世仁，Gooddald MF,Datton Cr：空间数据的三角形四叉树结构及其基本操作．环境遥感，1995，10(4)

(1) 在 0 分区中三角形地址转换笛卡儿坐标模型：

$$x_k = \left\{2^k - \sum_{i=1}^{k}\left[(-1)^{a_{i2}-1} a_{i1} 2^{k-i}\right]\right\} 2^{n-k}$$

$$y_k = \frac{2^k + \sum_{i=1}^{k}\left[(-1)^{NZ_i + a_{i2}} \times 2(\bar{a}_{i1} \cap a_{i2}) + a_{i1}\right] 2^{k-i}}{\sqrt{3}} 2^{n-k-1}$$

式中，(x_k, y_k) 为在第 k 级分解时的三角形地址的笛卡儿坐标。

(2) 球面上三角形面积 ΔA_ϕ 模型：

$$\Delta A_\phi = k\left(\sin c\chi + \frac{r^2}{8R^2}\sin c\chi + \frac{r^2}{8R^2}\frac{\sin 3\chi}{\chi}\right)$$

$$\sin c\chi = \frac{\sin\chi}{\chi}$$

$$k = \frac{\pi^3 R^2}{2^{2n+4}}$$

$$\chi = \frac{\pi}{2} - \phi$$

式中，R 为椭球长轴；r 为椭球长短轴之比；k 为分解级；n 为分解级数。

格点破度变化率

张兵：黄土丘陵区数字地貌模型与遥感影像分类.环境遥感，1996，11(4)

$$S_5 = \begin{cases} \dfrac{|\alpha_j - \alpha_5|_{\max}}{b} & (j = 2,4,6,8) \\ \dfrac{|\alpha_j - \alpha_5|_{\max}}{\sqrt{2}b} & (j = 1,3,5,7,9) \end{cases}$$

式中，S_5 为中心格点的破度变化率；α_j 为 j 号格点的坡度；b 为格网边长。

草地雪灾监测分析公式

史培军，陈音：RS 与 GIS 支持正气草地雪灾监测试验研究。地理学报，1996，51(4)

(1) 多时相最小亮度合成消云计算公式：

$$Ch_1 = \min(Ch_{11}, Ch_{21}, \cdots, Ch_{j1})$$

$$Ch_4 = \max(Ch_{14}, Ch_{24}, \cdots, Ch_{j4})$$

式中，Ch_1 和 Ch_4 为结果值；Ch_{j1} 为各时相的 1 通道值；Ch_{j4} 为各时相的 4 通道值；j 为所取时段的总天数。

(2) 相对地势起伏程度计算公式：

$$R_0 = E - H_0$$

式中，R_0 为 Z_0 点的地形参数；E 为 Z_0 点上风向上各点高程的平均值；H_0 为 Z_0 点的高程值。

山洪灾情评估模型

赵士鹏：基于GIS的山洪灾情评估方法研究。地理学报，1996. 51(5)

(1) 山洪冲击力模型：

$$F = \frac{r_c}{g} V_c^2$$

式中，F 为作用在流速方向垂直单位面积上的动压力 $(t \cdot m^{-2})$；r_c 为山洪流体容重 $(t \cdot m^{-2})$；g 为重力加速度；V_c 为流速。

(2) 承灾体承灾能力分析模型：

$$D_i = \begin{cases} \dfrac{1}{1 - ae^{-bF}} & (F < \delta_p) \\ 1 & (F > \delta_p) \end{cases}$$

式中，D 为第 i 类承灾体的受损害程度；F 为冲击力；δ_p 第 i 类承灾体承受山洪冲击的极限能力；a 和 b 为待求系数。

(3) 灾情等级评价模型：

$$DM = \sum_i (VC_i \cdot D_i)$$

(4) 产流模型：

$$F_{\max} = FC + A\left(\frac{PIV}{TP}\right)^P$$

式中，$F_{\max}$ 为下渗强度；FC 为稳渗率；A 为最大下渗强度与稳渗率之差；PT 为控制带内孔隙的总体积；PIV 为饱和前能被储存于控制带内的水的体积；P 为与下渗强度减速度有关的系数。

(5) 洪水运动连续方程：

$$I - Q = \frac{dS}{dt}$$

式中，I 为入流量；Q 为出流量；S 为格网单元内储存水的数量；t 为时间。

(6) 洪水运动流速公式：

$$V = \frac{1}{n} SL^a R^b$$

式中，V 为流速；n 为曼宁系数；SL 为比降；R 为水

力半径；a, b 为经验参数。

(7) 泥沙冲淤连续方程：

$$I_s + D_r - Q_s = \frac{d(CS)}{dt}$$

式中，I_s 为从邻近格网单元的泥沙输入量；D_r 为本格网单位的泥沙冲淤量；Q_s 为泥沙输出量；C 为本格网单元水体中的泥沙浓度；t 为时间；S 为格网单元内水的储存量。

(8) 泥沙输送亏损模型：

$$D_r = \alpha(T_c - q_s)$$

式中，为 T_c 输沙能力；q_s 为实际输沙率；α 沉积的一阶反应系数。

农田损失的 GIS 评价公式

黎夏：利用遥感与 GIS 对农田损失的监测及定量评价方法。地理学报，1997, 52(3)

(1) I_{ndv} 植被指数：

$$I_{ndv} = \frac{r_{ni} - r}{r_{ni} + r}$$

式中，r_{ni} 为近红外波段；r 为红外波段。

(2) I_{twr} 植被指数：

$$I_{twr} = \frac{(r_{ni} - r - L)(1 + K)}{r_{ni} + r + K}$$

式中，K 为参数；L 为土壤背景纠正量。

(3) 东莞市的土地资源评价方程：

$$S = \sum_i W_i X_i = 0.31S + 0.156 I_{twr} + 0.493S$$

式中，$X_i = \dfrac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$；$S$、$I_{twr}$ 和 S 分别为土壤、植被和坡度的归一化要素值。

(4) 空间分布特性指数：

$$H_n = \frac{-\sum_{i=1}^{n} P_i \lg P_i}{\lg n}$$

式中，X_i 为观测值；$P_i = \dfrac{X_i}{\sum_{i=1}^{n} X_i}$。

(5) 集中度为：

$$C_n = 1 - H_n$$

(6) 评价农田损失的综合指数：

$$I_{loss} = \frac{S_{loss}}{1 - H_n} = \frac{\sum_i \sum_j S_j(i)}{1 - H_n}$$

式中，S_{loss} 为适应性的总的损失；$S_j(i)$ 为发生农田损失的位置 i 上的第 j 类农业的适应性值。

空间分解模型

Walker P A, Mallawaarachchi T：利用 NOAA-AVHRR NDVI 对农业统计量进行分解。Remote Sensing of Environment, 1998, 63

如果给定一个在资源区域(s)与目标区域 t 之间的叠加区域 a_{st}，以及资源区域(s)的属性为 U_s，那么目标属性 V_t 可以计算求得：

$$V_t = \sum_s U_s \left(a_{st} \Big/ \sum_t a_{st} \right)$$

被用来测量土地利用类型 i 和目标区 t 的控制点 j 之间的相似性的 Gower metric (GM)可以通过下式求得。

$$GM = D_{ijt} = \sum_{k=1}^{n} \left| e_{jk} - d_{tk} \right| / (k_{max} - k_{min})$$

式中，d_{tk} 目标区 t 的第 k 公里的描述符号；e_{jk} 是控制点 j 第 k 公里的描述符号；k_{max} 与 k_{min} 是所有控制点 j 和目标区 t 第 k 公里的描述符号的最大值和最小值。

森林生态系统中氮矿化量的地域性估测模型

Fan W, Randolph J C, Ehman J L：用地理信息系统来对森林生态系统中氮矿化量的地域性估测，Ecological Applications, 1998, 8(3)

(1) 森林生态系统中长期氮净矿化(N_{net})：

$$N_{net} = N_{min} - N_{imb}$$

式中，N_{min} 总的氮矿化量；N_{imb} 是指氮的固化量。

(2) 威斯康星州布莱克霍克岛上的基于野外观测的模型：

$$N_{min} = LT_{decp} \frac{-0.0379[N:C]}{-0.029\,84 + [N:C]} f_{st}$$

式中，N_{min} 是年度、LT_{decp} 是指每年的落叶分解量；$N:C$ 是指落叶成分中 N 和 C 的浓度的加权平均值的比率；f_{st} 是指土壤结构系数。

(3) 用新英格兰北部的北方阔叶林中的六个落叶

树种的落叶分解数据，来表示每单位落叶质量损失所产生的氮的固化量(N_{imbp}，$mg \cdot g^{-1}$)：

$$N_{imbp} = \{[(100 - AN)^2 \div (-4B) - 100N]/1000\} \div \{1 - [(100 - B)/2 \times 0.01]\}$$

式中，A=56.1+1.86L；B=−56.1+1.86L；L 和 N 分别代表落叶中最初的木质素和氮浓度。

$$N_{imb} = N_{imbp} \; K_{adjusted}(0.7LT_{prod}) \times [1 + (0.8 - K_{adjusted}) + (1 - 2K_{adjusted})]$$

式中，$K_{adjusted}$ 是每年落叶质量损失百分比的估测值；LT_{prod} 是指总的落叶产量。

调整后的 N_{min} 为：

$$N_{min} = K_{adjusted}(0.7LT_{prod}) \times [1 + (0.8 - K_{adjusted}) + (1 - 2K_{adjusted})] \left(\frac{-0.0379[N:C]}{-0.029\,84 + [N:C]} \right) S_{TF}$$

LISEM 子模型

杨勤科，李锐：LISEM——一个基于 GIS 的流域土壤流失预报模型。水土保持通报，1998，18(3)

(1) 截留过程模型：

通过计算降雨过程中作物和自然植被的蓄水量来模拟对雨量的截留，最大截留量用 Hoyningen-huene (1 981)方程计算：

$$S_{max} = 0.935 + 0.498 \times I_{la} - 0.00575 I^2{}_{la}$$

式中，S_{max} 为最大截留量 (mm)；I_{la} 为叶面积指数。

降雨累计截留量用 Aston 方程计算，用以模拟 S_{max} 前的特性。

$$C_a = S_{max}[1 - e^{-(1-p)p_a S_{max}}]$$

式中，C_a 为累计截留量；P_a 为累计雨量；P 为修改参数因子，P=1− 0 .0 46 I_{la}。

(2) 渗透与水分运移过程模型：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right)$$

式中，k 为土壤导水率；h 为基质势 (m)；θ 为土壤含水量；z 为重力势 (基准面以上的高度)；t 为时间。

(3) 地表微地形填洼模型：

$$R_{max} = 0.112R_r + 0.031R_r^2 - 0.012R_r\,a$$

式中，R_{max} 为填洼量 (cm)；R_r 为糙度 (cm)；a 为坡度 (°)。

用来填洼的净雨量(降雨量+表层流−截留−渗透)用下式计算：

$$R_n = 0.329R_r + 0.073R_r^2 - 0.018R_r a$$

产量所需雨量：

$$D = R_n(0.0527R_r - 0.049a)$$

式中，D 为产流所需雨量。

覆盖水地表最大比例可用下式计算：

$$F_{max} = 0.152R_r - 0.08R_r^2 - 0.08R_r a$$

式中，F_{max} 为覆盖水地表最大比例；其余符号同上。

实际覆盖水地表比例用下式计算：

$$F = F_{max}(R_d / R_{max})^{0.6}$$

(4) 溅蚀分散模型：

$$D_d = (2.82/a \cdot E \cdot \exp^{-1.48d} + 2.96)(P - I)(dx^2/dt)$$

式中，D_d 为溅蚀分散量 ($g \cdot s^{-1}$)；a 为土壤团粒稳定性；E 为降雨动能；d 为土壤稳定水流厚度；P 为降雨量；I 为截留量；dx 为像元大小；t 为时间增量。

(5) 输沙力模型：地表径流输沙力，被作为单位水流能量的函数来计算：

$$\tau_c = C_1 (\alpha \cdot V^{-0.4})^{D_1}$$

式中，τ_c 为输沙力 (cm^3)；α 为坡度 ($m \cdot m^{-1}$)；V 为平均流速；C_1 和 D_1 为随机待定参数，其值与表层土壤中值粒径有关。

(6) 细沟、细沟间侵蚀模型：无论输沙力小于溅蚀含沙量 (来自上坡或来自前一时段)与否，沉积率均用下式计算：

$$D_c = \omega \;\; v_s \;\; (\tau_c - C)$$

式中，D_c 为沉积率；ω 为水流宽度；v_s 为起沙速度；τ_c 为输沙力；C 为含沙量。

如果输沙力超过泥沙含量，径流分散力用下式计算：

$$D_f = y\omega v_s \;\; (\tau_c - C)$$

式中，D_f 为径流分散量，y 为待定系数，可表达为 $y=\mu/\mu_t-1/(0.089-0.56C_h)$，$\mu$ 为临界剪切速度；μ_t 为细沟侵蚀临界剪切速度；C_h 为饱和土壤黏结力。

基于地理信息系统的数字环境模型

陈晓峰，张增祥：基于地理信息系统的数字环境模型研究. 遥感学报，1998，2(4)

(1) 环境评价模型：

$$E_P=\sum_{i=1}^{r}k_i k_e$$
$$i=1,2,\cdots,n$$

式中，E_P 为第 P 个分析单元的环境质量指数；$\sum k_i$ 为第 i 各专题指标要素经过标准化处理后的定量表达值；k_e 为反映该专题要素对环境质量评价重要性的权系数；n 为评价因子个数。

(2) 环境动态监测模型：

$$\Delta E_P=\frac{E_P^t-E_P^{i-j}}{t_i-t_j}$$
$$p=1,2,\cdots;\quad t_i=1,2,\cdots;\quad t_j<t_i$$

式中，ΔE_P 为第 p 个分析单元在 t_i-t_j 时段内单位时间的变化量；E_P^i 为该单元在第 t_i 时刻的环境状况；E_P^{i-j} 为此时刻以前 t_j 时刻的环境评价结果。

(3) 环境预测模型：

$$E_P^t=E_P^i+\Delta E_P t$$

式中，E_P^t 为 i 时刻后的某一时刻 t 时的环境状况；E_P^i 为预测初始时刻 i 时的环境本底状况。

海洋初级生产力遥感与 GIS 评估模型

李国胜，邵宇宾：海洋初级生产力遥感与 GIS 评估模型研究. 地理学报，1998，53(6)

(1) 叶绿素光谱辐射原理：

$$L(\lambda)=L_s(\lambda)+L_d(\lambda)$$

$$L(\lambda)=\{L_w(\lambda)+L_g(\lambda)\}\,T_A(\lambda)+L_p^A(\lambda)+L_p^R(\lambda)$$

式中，$L_s(\lambda)$ 为海面耀光反射；$L_d(\lambda)$ 为反射天空光辐射；$L_w(\lambda)$ 为离水反射辐射；$L_A(\lambda)$ 为大气透射比；$L_p^A(\lambda)$ 为大气气溶胶路程辐射；$L_p^R(\lambda)$ 为雷利散射路程辐射。

(2) 叶绿素浓度反演模型：

$$C=a(H_{FL})+b$$

式中，C 为叶绿素浓度，对荧光法测量叶绿素浓度，其计算公式可表达为 $C=a(H_{FL})+b$，H_{FL} 为荧光高度，a,b 为系数；R_i 和 R_j 分别是两个波长上的辐射率；i,j 为具有叶绿素反射辐射特征的不同波段。

(3) 基于表层海水叶绿素浓度的海洋初级生产力经验算法模式：

$$P=CQR/K$$

式中，P 为浮游植物光合作用速率[mg · m^{-2} · h^{-1}]；C 为叶绿素浓度(mg · m^{-3})；K 为海水消光系数(m^{-1})；R 为决定于海面光强的相对光合作用率；Q 为同化数(定义为单位叶绿素在单位时间内同化的碳量)。

(4) 基于表层海水叶绿素浓度的海洋初级生产力理论算法模式：

$$P_{t,d}=P_{t,\max}\frac{aI_{0,\max}\sin^3(\pi/D)te^{-kd}}{1+aI_{0,\max}\sin^3(\pi/D)te^{-kd}}$$

式中，$P_{t,d}$ 为时间 t、深度 d(m)上的比光合作用速率(mg · m^{-2} · h^{-1})；$P_{t,\max}$ 为时间 t 的最大光合作用速率；a 为由光-光合作用关系曲线中的起始斜率与 $P_{\max}$ 的交点求得的光强的倒数；$I_{0,\max}$ 为太阳高度最大时(正午)海面光强(klx)；D 为昼长(h · d^{-1})；k 为海水的光衰减系数(m^{-1})。

(5) 基于表层海水叶绿素浓度的海洋初级生产力遥感算法模式：

$$P_t=FC$$

式中，P_t 为海洋初级生产力；F 为常数；C 为由海洋水色遥感资料反演得出的海洋近表层叶绿素浓度。

(6) 海洋初级生产力 GIS 估算模型：

$$P_t=\sum\left[phy(x,y,z),a,b,c\right]$$

式中，P_t 为“箱式”空间内的初级生产力；$phy(x,y,z)$ 为不同真光层深度上单位面积内的叶绿素浓度；a，b 和 c 为环境因子。

土地资源生态环境背景与利用程度关系的分析公式

高志强，刘纪远，庄大方：中国土地资源生态环境背景与利用程度的关系. 地理学报，1998，53(增刊)

(1) 土地资源生态背景质量指数：

$$I_{Qj}=100\sum_{i=1}^{5}Q_i(A_i/S_j)$$

式中，I_{Qj} 为 j 行政单元的耕地生态背景质量指数；Q_i 为第 i 级的生态背景质量等级量值；A_i 为第 i 级的耕地面积；S_j 为第 j 个行政单元的面积。

(2) 土地资源利用程度指数：

$$I_U=100\sum_{i=1}^{n}A_iC_i$$

式中，I_U 为土地利用程度综合指数；A_i 为第 i 级土地利用程度分级指数；C_i 为第 i 级土地利用程度分级面积百分比。

(3) 生态环境背景指数 I_Q 和土地资源利用程度指数 I_U 的相关分析：

$$r=\frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sigma_x\sigma_y}$$

式中，σ_x 和 σ_y 分别是 x 和 y 的标准差；r 为相关系数。

(4) 生态环境背景指数和土地资源利用程度指数的拟合趋势面分析：

$$\hat{z}_i=a_0+a_1x_i+a_2y_i+a_3x_i^2+a_4x_iy_i+a_5y_i^2+a_6x_i^3+a_7x_i^2y_i+a_8x_iy_i^2+a_9y_i^3$$

式中，n 为二维空间中观测点个数；(x_i,y_i) 为其观测坐标；$z_i(1,2,\cdots,n)$ 为观测值；a_0，a_1，a_2，…，a_9 为待定系数(用观测值 z_i 与趋势值 $\hat{z}_i$ 之差的平方和为最小的条件，利用最小二乘法，可求出待定系数)。

土壤侵蚀量的估算

游松材，李文卿：GIS支持下的土壤侵蚀量估算——以江西省泰和县灌溪乡为例。自然资源学报，1999，14(1)

(1) 土壤侵蚀方程：

$$E=R\cdot K\cdot L\cdot S\cdot P\cdot C$$

式中，E 为年平均土壤侵蚀量($t\cdot hm^{-2}$)；R 为降水及径流因子，FAO 建立的通过修订 Fourier 指数求算 R 值的方法。

$$F=\sum_{i=1}^{12}j_i^2/J$$

式中：i 是月份；j_i 是月降水量。

R 与 F 的关系表达式为：

$$R=a\ F+b$$

式中，a 与 b 的值取决于气候条件；K 为土壤侵蚀性因子；L 及 S 为地形因子；P 为水土保护措施因子；C 为地表植被覆盖因子。

(2) 年平均地表覆盖率的加权平均因子计算公式

$$C_{year}=\left(\sum_{i=O}^{M}\frac{j_i^2}{J\ C_1}+\sum_{i=A}^{Jn}\frac{j_i^2}{J\ C_2}+\sum_{i=Jl}^{S}\frac{j_i^2}{J\ C_3}\right)\Bigg/\sum_{i=J}^{D}\frac{j_i^2}{J}$$

式中，C_1 是代表10月~次年3月份的地表覆盖率；C_2 是代表4~6月份的地表覆盖率；C_3 是代表7~9月份的地表覆盖率；j_i 是月降水量(mm)；J 是年降水(mm)；O、M、A、Jn、Jl、S、D 和 J 分别代表10月、3月、4月、6月、7月、1月和12月；C_{year} 代表年评价地表覆盖率。

拓扑一致性模型

齐清文，张安定：关于多比例尺GIS中数据库多重表达的几个问题的研究。地理研究，1999，18(2)

(1) 假定各数学参量：

假定有一系列表达层 $S_0,\cdots,S_n$，制图概括操作应符合"单调性原则"，其公式表达为：

$$S_i\leqslant SS_{i+1}$$

(2) 给数据多重表达作拓扑关系定义：

定义 1a：对于两个表达层 $S_i\leqslant S_{i+1}$ 上的所有对象 $O_{ix}\in S_i$，$O_{jx}\in S_j$，如果满足条件 $T(O_{ix})\leqslant T(O_{jx})$，则该两层是"对象相似"的。

定义 1b：对于两个表达层 $S_i\leqslant S_{i+1}$ 上的所有对象 $O_{ix},O_{iy}\in S_i$，$O_{jx},O_{jy}\in S_j$，如果满足条件 $T(O_{ix},O_{iy})\leqslant T(O_{jx},O_{jy})$，则该两层是"关系相似"的。

定义 1c：对于两个表达层 $S_i\leqslant S_{i+1}$ 上的所有对象 $O_{ix},O_{iy}\in S_i$，$O_{jx},O_{jy}\in S_j$，如果它们之间对象相似且关系相似，即如果满足条件 $T(O_{ix})\leqslant T(O_{jx})\wedge T(O_{iy})\leqslant T(O_{jy})\wedge T(O_{ix},O_{iy})\leqslant T(O_{jx},O_{jy})$，则该两个表达层相似。

定义 2a：对于两个表达层 $S_i\leqslant S_{i+1}$ 上的所有对象 $O_{ix}\in S_i$，$O_{jx}\in S_j$，如果满足条件 $T(O_{ix})=T(O_{jx})$，则该两层是"对象同构"的。

定义 2b：对于两个表达层 $S_i\leqslant S_{i+1}$ 上的任意两个对象 $O_{ix},O_{iy}\in S_i$，$O_{jx},O_{jy}\in S_j$，如果满足条件 $T(O_{ix},O_{iy})=T(O_{jx},O_{jy})$，则该两层是"关系同构"的。

定义 2c：对于两个表达层 $S_i\leqslant S_{i+1}$ 上的任意两个对象 $O_{ix},O_{iy}\in S_i$，$O_{jx},O_{jy}\in S_j$，如果它们之间对象同构且关系同构，即如果满足条件 $T(O_{ix})=T(O_{jx})$

$\wedge T(O_{ix})=T(O_{jx})\wedge T(O_{ix},O_{iy})=T(O_{jx},O_{jy})$，则该两个表达层同构。

三维立方体体元双线形插值公式

李红台，崔伟宏：地理信息系统中时空多维数据可视化技术研究。遥感学报，1999，3(2)

$$
\begin{aligned}
s(x,y,z)=&(1-\Delta x)(1-\Delta y)(1-\Delta z)c_{i,j,k}-\\
&(1-\Delta x)\Delta y(1-\Delta z)c_{i,j+1,k}+\\
&(1-\Delta x)\Delta y\Delta z c_{i,j+1,k+1}+\\
&(1-\Delta x)(1-\Delta y)\Delta z c_{i,j,k+1}+\\
&\Delta x(1-\Delta y)(1-\Delta z)c_{i+1,j,k}+\\
&\Delta x\Delta y(1-\Delta z)c_{i+1,j+1,k}+\\
&\Delta x(1-\Delta y)\Delta z c_{i+1,j,k+1}+\\
&\Delta x\Delta y\Delta z c_{i+1,j+1,k+1}
\end{aligned}
$$

式中，$c_{i,j,k}$ 表示数据在 $x=i$，$y=j$ 和 $z=k$ 的值；$c_{i+1,j+1,k+1}$ 表示数据在 $x=i+1$，$y=j+1$ 和 $z=k+1$ 的值；Δx，Δy 和 Δz 表示插值点相对应于 $c_{i,j,k}$ 的在 x，y 和 z 坐标轴的增量。

频率计算公式

朱大奎，李海宇，潘少明：深圳湾海底沉积层的研究。地理学报，1999，54(3)

$$\lambda=V\ L$$

式中，L 为波长；V 为波速；λ 为频率。

地形纠正的数字高程模型

李震，孙文新，曾群柱：综合 RS 与 GIS 方法提取青藏高原冰川变化信息。地理学报，1999，54(3)

$$E=E_s/\cos\theta_i$$

$$\cos\theta_i=\cos S\times\cos\theta_0+\sin S\times\cos\theta_0\times\cos(T-A)$$

式中，E_s 为原始图像灰度；E 为纠正后图像灰度；θ_i 为当地太阳入射角；S 和 A 是像素的坡度和坡向；T 和 θ_0 分别为太阳在水平面的方位角和入射角。

粮食生产潜力计算过程

党安荣，阎守邕，周艺：地理信息系统支持下的中国粮食生产潜力研究。遥感学报，1999，3(3)

1. 气候生产潜力计算

(1) 光合生产潜力 Y_Q 模型：

$$Y_Q=0.219Q$$

式中，Q 为太阳总辐射。

(2) 温度有效系数 $f(T)$ 模型：

$$f(T)=\frac{N}{365}$$

(3) 水分有效系数 $f(W)$ 模型：

$$f(W)=\frac{P}{E_0}$$

2. 土地生产潜力计算

土壤有效系数 $f(S)$ 模型：

$$f(S)=\frac{\sum_i f(S_i)\ AS_i}{\sum_i AS_i}$$

$$f(S_i)=\sum_j W_{ij}\ A_{ij}$$

3. 社会生产潜力计算

(1) 灌溉有效系数 $f(I)$ 与灌溉生产潜力计算 y_I 模型：

$$f(I)=\begin{cases}\dfrac{1}{f(w)} & (E_0<I_0+P)\\ 1+\dfrac{I_0}{E_0\ f(w)} & (E_0>I_0+P)\end{cases}$$

$$I_0=594\frac{S_I}{S_t}$$

$$y_I=f(I)y_S$$

(2) 化肥增产效力 ΔY_F 与化肥生产潜力 Y_F 的计算模型：

$$\Delta Y_F=2.2875\left(6.58e^{-0.047991x}+1.08\right)\ x\frac{1-f(s_i)}{1-f(s)}$$

$$Y_F=Y_I+\Delta Y_F$$

(3) 社会有效系数 $f(M)$ 与社会生产潜力 y_G 计算模型：

$$f(M)=\sum_{i=1}^{10}W_iA_i$$

$$y_G=f(M)y_F$$

地貌特征参数的选择与计算

刘勇，王文祥，潘保田：夷平面的三维显示与定量分析方法初探。地理研究，1999，18(4)

(1) 地表粗糙度计算公式：

$$R_{i,j}=\left|\frac{Z_{i+1,j+1}+Z_{i,j}}{2}-\frac{Z_{i,j+1}+Z_{i+1,j}}{2}\right|$$

式中，$R_{i,j}$ 为粗糙度；$Z_{i,j}$ 为点(i,j)的高程。

(2) 程变异计算公式：

$$V=S/\overline{Z}$$

式中，$S=\sqrt{\frac{1}{8}\sum_{i=1}^{8}\left(Z_i-\overline{Z}^2\right)}$，$Z_i(i=1,2,\cdots,8)$为栅格单元的 8 邻域的高程值；$\overline{Z}$ 为平均高程。

(3) 坡度计算公式：

$$G=\arctan\sqrt{p^2+q^2}$$

式中，G 为坡度。

(4) 垂向曲率计算公式：

$$K_v=-\frac{p^2r-2pqr+q^2t}{\left(p^2+q^2\right)\sqrt{\left(1+p^2+q^2\right)^3}}$$

式中，K_v 为垂向曲率。

(5) 水平曲率：

$$K_h=-\frac{p^2r-2pqs+q^2t}{\left(p^2+q^2\right)\sqrt{\left(1+p^2+q^2\right)^3}}$$

式中，K_h 为水平曲率。

(6) 累计曲率：

$$K_a=K_hK_v$$

中，r,t,s,p 和 q 分别是如下函数的偏导数：$z=f(x,y)$；
$r=\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}$；$t=\frac{\partial^2 z}{\partial y^2}$，$s=\frac{\partial^2 z}{\partial x\partial y}$，$p=\frac{\partial z}{\partial x}$ 和 $q=\frac{\partial z}{\partial y}$。

r,t,s,p 和 q 的离散化表达式如下：

$$r=\frac{z_1+z_3+z_4+z_6+z_7+z_9-2(z_2+z_5+z_8)}{3\omega^2}$$

$$t=\frac{z_1-z_2+z_3+z_7+z_8+z_9-2(z_4+z_5+z_6)}{3\omega^2}$$

$$s=\frac{z_3+z_7-z_1-z_9}{4\omega^2}$$

$$p=\frac{z_3+z_6+z_9-z_1-z_4-z_7}{6\omega^2}$$

$$q=\frac{z_1+z_2+z_3-z_7-z_8-z_9}{6\omega}$$

式中，z_i 分别为 8-邻域格网点的高程值，$i=1\sim 9$；ω 表示一个格网所代表的实际距离大小。

洪水灾害风险评估的指标模型

周成虎，万庆，黄诗峰等：基于 GIS 的洪水灾害风险区划研究。地理学报，2000，55(1)

P(洪水灾害)= f(触发因子，下垫面因子，社会经济发展水平因子)

式中，当最大三日暴雨量 $P<30$mm 时，P(洪水危险程度)为 0；当最大三日暴雨量在 30mm $<P<$ 200mm 时，P(洪水危险程度)= $P/(200\sim300)$；当最大三日暴雨量 $P>200$ 时，P(洪水危险程度)为 1。

贝叶斯统计推理定理及模型

张洪亮，李芝喜，王人潮等：基于 GIS 的贝叶斯统计推理技术在印度野牛生境概率评价中的应用。遥感学报，2000，4(1)

(1) 贝叶斯定理：

$$P(C_i\backslash x)=\frac{P(x\backslash C_i)P(C_i)}{\sum_{i=1}^{n}P(x\backslash C_i)P(C_i)}$$

$$(i=1,2,\cdots,n)$$

(2) 贝叶斯综合模型(BIM)：

$$P_{\mathrm{BIM}}=\frac{1}{1+e\left(\lg\frac{1-P_{\mathrm{EM}}}{P_{\mathrm{EM}}}-\lg\frac{P_{\mathrm{TSM}}}{1-P_{\mathrm{TSM}}}\right)}$$

式中，P_{BIM} 为贝叶斯综合模型生成的预估概率，P_{EM} 和 P_{TSM} 分别为由环境模型和趋势表面模型产生的概率预估值。

GIS 中缓和曲线的不确定性模型

童小华，史文中，刘大杰：GIS 中缓和曲线的不确定性模型。遥感学报，2000，4(1)

(1) 缓和曲线上任一点在 XOY 坐标系中坐标的微分关系式：

$$\begin{bmatrix}x_i'\\y_i'\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x_1\\y_1\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\cos\alpha & \cos(\alpha+c\cdot\frac{\pi}{2})\\ \sin\alpha & \sin(\alpha+c\cdot\frac{\pi}{2})\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\bar{x}'_i\\ \bar{y}'_i\end{bmatrix}$$

式中，α 是直缓点 B 处切线的方位角，也就是直线段的方位角；(x_1, y_1) 是缓和曲线起点即直缓点在大地坐标系中的坐标；c 为缓和曲线偏转参数。

(2) 任意点 i 坐标的方差和 ε_σ 模型：

$$\sigma_\theta^2 = \cos^2\theta \cdot \sigma_{x_i}^2 + \sin^2\theta \cdot \sigma_{y_i}^2 + \sin 2\theta \cdot \sigma_{x_i y_i}$$

式中，$\sigma_\theta, \sigma_{x_i}^2, \sigma_{y_i}^2$ 分别为误差带宽和 i 点坐标的方差；θ 为法线方向的方位角。

(3) 最大方向的 ε_m 带宽模型：

$$S_{\varphi\lambda}^2 = (x_\varphi - x_\lambda)^2 + (y_\varphi - y_\lambda)^2 =$$

$$(x_i - x_\lambda + \sigma_\varphi \cos\varphi)^2 + (y_i - y_\varphi + \sigma_\varphi \sin\varphi)^2$$

式中，$S_{\varphi\lambda}$ 为距离最大的点 G_φ 到由 G_φ 向缓和曲线作法线与曲线的交点 G_λ 的距离。

土地资源综合潜力评价模型

高志强，刘纪远：基于遥感和GIS的中国土地潜力资源的研究。遥感学报，2000，4(2)

$$Ob_i = \sum_{j=1}^{n} S_j \ W_j$$

式中，j 为指标数；W_j 为权盘指数；S_j 为标准化处理结果。

水库实际库容及水域面积计算公式

曾永年，马海州，沙占江等：龙羊峡库区环境动态监测信息系统的建立与应用。遥感学报，2000，4(2)

$$V = s\sum(H - h_i)$$

$$S = sn$$

式中，s 为DEM像元面积；H 为水库水位高程；h_i 为库域DEM各像元高程值；n 为库域DEM像元数。

土地利用分类及变化转移矩阵

史培军，陈晋，潘耀忠：深圳市土地利用变化机制分析。地理学报，2000，55(2)

(1) 土地利用分类及转移矩阵：

$$P_i^{k+1}(x_j) = \frac{P_i^{(k)}(x_j)\sum_{l=1}^{8} P_l(x_j)}{\sum_j \left[P_i^{(k)}(x_j) \sum_l P_l(x_j) \right]}$$

式中，k 为调整次数；l 为像元 a_i 相邻的8个像元。

(2) 土地利用类型的总转化率(P)及向城镇用地的转化率(Q)的模型：

缓冲区内土地利用类型

$$P = \frac{\text{发生变化的像元总和}}{\text{缓冲区内的像元总和}}$$

缓冲区内以城镇用地为转换目标的土地类型

$$Q = \frac{\text{发生变化的像元总和}}{\text{缓冲区内的像元总和}}$$

地貌分形形态模拟的实现

许世远，孙以义：地貌形态模拟。地理学报，2000，55(3)

(1) 边界上高程插值模型：

$$y = (y_1 + y_2)/2 + N(0, \text{stdev})$$

式中，y_1 和 y_2 是两端点的高程值；y 是插值点的高程值；$N(0,\text{stdev}) = \text{stdev} \cdot N(0,1)$。

(2) 作数字高程模型坐标配准的最小二乘法纠正算法公式：

$$X' = A_0 + A_1 X + A_2 Y + A_3 X Y$$

$$Y' = B_0 + B_1 X + B_2 Y + B_3 X Y$$

式中，X 和 Y 表示原始坐标；X' 和 Y' 表示配准纠正后的坐标；$A_0, A_1, A_2, A_3, B_0, B_1, B_2$ 和 B_3 表示最小二乘法系数。

扩展强度指数

刘盛和，吴传均，沈洪泉：基于GIS的北京城市土地利用扩展模型。地理学报，2000，55(4)

$$\beta_{i,t-t+n} = \left[\left(U_{\text{LA}i,t+n} - U_{\text{LA}i,t}\right)/n\right] / T_i \times 100$$

式中，$\beta_{i,t-t+n}, U_{\text{LA}i,t+n}$ 和 $U_{\text{LA}i,t}$ 分别为空间单元 i 的年均扩展强度指数、在 $t+n$ 及 t 年时的城市土地利用面积；$T_{\text{LA}i}$ 为其土地总面积。

流域相对不易产流度计算公式

任立良，刘新仁：基于DEM的水文物理过程模拟，地理研究，2000，19(4)

流域相对不易产流度=

$$\frac{\max\left[\ln(a/\tan\beta)_i\right] - \ln(a/\tan\beta)_i}{\max\left[\ln(a/\tan\beta)_i\right] - \min\left[\ln(a/\tan\beta)_i\right]}$$

式中，a 为排向第 i 点的单宽汇水面积；$\tan\beta$ 为该点处坡角的正切函数。

地理曲线的定位误差模型

刘文宝，邓敏，夏宗国：矢量GIS 图上地理曲线的定位误差模型。遥感学报，2000，4(4)

1. 地理曲线的函数模型

(1) 回归函数模型：

$$y(x)=c_0+c_1x+c_2x^2+c_3x^3+\cdots+c_kx^k$$

(2) 特征多项式拟合函数模型：

$$\begin{cases}x=f_x(x_1,y_1,x_2,y_2,\cdots,x_n,y_n,l)\\ y=f_y(x_1,y_1,x_2,y_2,\cdots,x_n,y_n,l)\end{cases}$$

式中，n 为曲线上特征点的数量。

(3) 插值多项式函数模型：

$$\begin{cases}x_t=f_\alpha(\alpha^{\mathrm T},t)\\ y_t=f_\beta(\beta^{\mathrm T},t)\end{cases}$$

式中，x_t 和 y_t 为插值点坐标；α 和 β 为插值函数的系数向量；t 为插值参数。

2. 地理曲线的误差模型

(1) 回归函数误差模型：

$$y(x)=\overline{y}(x)\pm\sigma_\gamma=\overline{c}_0+\overline{c}_1x+\overline{c}_2x^2+\cdots+\overline{c}_kx^k\pm\sigma_\gamma$$

式中，系数 $\overline{c}_i(0\leqslant i\leqslant k)$ 为最小二乘估计值；σ_γ 为在 γ 置信水平下误差带的宽度。

(2) 特征多项式拟合函数误差模型：

$$\sum_{ZZ}=\begin{pmatrix}\sigma_x^2 & \sigma_{xy}\\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2\end{pmatrix}=A^{\mathrm T}\sum_{00}A$$

式中，$\sum_{ZZ}$ 为任意点 $z=(xy)^{\mathrm T}$ 的协方差矩阵；$A^{\mathrm T}=\begin{pmatrix}p_1 & q_1 & p_2 & q_2 & \cdots & p_nq_n\\ h_1 & j_1 & h_2 & j_2 & \cdots & h_n & j_n\end{pmatrix}_{2\times 2n}$，且 $p_i=\partial f_x/\partial x_i$，$q_i=\partial f_x/\partial y_i$，$h_i=\partial f_y/\partial x_i$，$j_i=\partial f_y/\partial y_i$，$\sum_{00}$ 为 $2n\times 2n$ 维的特征点坐标的协方差矩阵。

(3) 插值多项式函数误差模型：

$$\begin{pmatrix}\sigma_{x_t}^2 & \sigma_{x_ty_t}\\ \sigma_{y_tx_t} & \sigma_{y_t}^2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}B_\alpha^{\mathrm T}\sigma_\alpha^2B_\alpha & B_\alpha^{\mathrm T}\sigma_{\alpha\beta}B_\beta\\ B_\beta^{\mathrm T}\sigma_{\beta\alpha}B_\alpha & B_\beta^{\mathrm T}\sigma_\beta^2B_\beta\end{pmatrix}$$

式中，$\sigma_\alpha^2=\begin{pmatrix}\sigma_{a_0}^2 & \sigma_{a_0a_1} & \cdots & \sigma_{a_0a_m}\\ & \sigma_{a_1}^2 & \cdots & \sigma_{a_1a_m}\\ & & \ddots & \vdots\\ & & & \sigma_{a_m}^2\end{pmatrix}$；

$$\sigma_{\alpha\beta}=\begin{pmatrix}\sigma_{a_0b_0} & \sigma_{a_0b_1} & \cdots & \sigma_{a_0b_n}\\ \sigma_{a_1b_0} & \sigma_{a_1b_1} & \cdots & \sigma_{a_1b_n}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ \sigma_{a_mb_0} & \sigma_{a_mb_1} & \cdots & \sigma_{a_mb_n}\end{pmatrix};$$

$$\sigma_\beta^2=\begin{pmatrix}\sigma_{b_0}^2 & \sigma_{b_0b_1} & \cdots & \sigma_{b_0b_n}\\ & \sigma_{b_1}^2 & \cdots & \sigma_{b_1b_n}\\ & & \ddots & \vdots\\ & & & \sigma_{b_n}^2\end{pmatrix};$$

$B_\alpha^{\mathrm T}=(1tt^2,\cdots,t^m)$；$B_\beta^{\mathrm T}=(1tt^2,\cdots,t^n)$。

3. 地理曲线长度的方差估计模型

$$\sigma_l^2=\sum_{i=1}^{m}e_i^2\sigma_{a_i}^2+2\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=i+1}^{m}e_ie_j\sigma_{a_ia_j}+\sum_{i=1}^{n}f_i^2\sigma_{b_i}^2+2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=i+1}^{n}f_if_j\sigma_{b_ib_j}+2\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}e_if_j\sigma_{a_ib_j}$$

辽河三角洲湿地净化的空间模型

李秀珍，肖笃宁，胡远满等：辽河三角洲湿地景观格局对养分去除功能影响的模拟。地理学报，2001，56(1)

(1) 灌渠子模型：

$$C_{(x,y)}=-A\cdot\ln d+B\ (A>0,B>0)$$

式中，$C_{(x,y)}$ 为灌渠上距泵站一定距离 d 处某点的氮磷浓度(mg · L^{-1})；A、B 的值与输入点上的氮磷浓度呈线性相关，$A=C_1\cdot P_{\text{inload}}+C_2$（$R_N^2=0.87$ $R_P^2=0.95$ $n=24$），$B=C_3\cdot P_{\text{inload}}+C_4$（$R_N^2$=0.78 $R_P^2=0.89$ $n=24$），$C_1\sim C_4$ 的值从实验数据中回归获得，对于氮和磷，由不同的常数值系列，P_{inload} 为泵站处养分输入浓度(mg · L^{-1})。

(2) 苇田子模型：

氮：$Y=-0.005+0.61X$（$R^2=0.84$ $n=41$）

磷：$Y=-0.013+0.85X$（$R^2=0.98$　$n=35$）

式中，Y 为去除率，X 为输入负荷、二者单位皆为 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$(氮)或 $mg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$(磷)，$X$ 的值可以根据日水量负荷($m^3 \cdot d^{-1}$)、苇田面积(m^2)和输入点上的养分浓度($mg \cdot L^{-1}$)得到：输入负荷(X)=日水量负荷×养分浓度/苇田面积。

上述过程模型与泵站、灌渠和苇田的分布图相结合，借助GIS的分析功能，就建立了辽河三角洲湿地养分去处功能的空间模型。

三维显示的基本原理

尤红建，刘彤，苏林等：城市 DSM 的快速获取及其三维显示的研究．遥感学报，2001，5(1)

依据三维坐标转换可以导出三维位置点(x,y,z)和鸟瞰显示的平面二维坐标(u,v)之间的数学变换公式：

$$u=\frac{x\cos\alpha-y\sin\varepsilon+l}{x\sin\alpha\sin P+y\cos\alpha\sin P+z\cos P+n}$$

$$v=\frac{(x\sin\alpha\cos P+y\cos\alpha\cos P-z\sin P+m)D}{x\sin\alpha\sin P+y\cos\alpha\sin P+z\cos P+n}$$

式中，(l,m,n)为坐标系之间的平移量(视点坐标和三维位置坐标系间的原点平移量)；α 为投影(鸟瞰方向)的方位角；P 为投影(鸟瞰方向)的俯仰角；D 维二位投影平面(进行三维显示的平面)到视点的距离。

基于 GIS 与空间统计分析的可持续发展评价模型

张显峰，崔伟宏：基于GIS与空间统计分析的可持续发展度量方法研究．遥感学报，2001，5(1)

1. 基于空间统计分析的可持续发展评价模型

(假设影响区域可持续发展的因子有 n 个，构成集合 N，从 N 中选择出 m 个因子)：

$$S_{\text{index}}=\{x_1,x_2,\cdots,x_m\}\quad(S_{\text{index}}\subset N)$$

2. SBSA 模型的应用

(1) 路通达性的计算：

$$A_i=W_1\,D_{i1}+W_2\,D_{i2}+\cdots+W_k\,D_{ik}$$

式中，W_1,W_2 和 W_k 式铁路、一级公路和 k 级公路的权重，D_{i1},D_{i2} 和 D_{ik} 是第 i 个像元到最近的铁路、一级公路和 k 级公路的欧式距离。

(2) 溉潜力的算法模型：

$$P_i=\sum C_k\,D_{ik}$$

式中，C_k 是 k 级水系像元灌溉潜力的贡献权重，D_{ik} 是第 i 个像元到最近的一级水系、二级水系和 k 级水系的欧式距离。

(3) 植被指数的计算模型：

$$I_{\text{ndv}}=(TM4-TM3)/(TM4+TM3)$$

(4) 栅格化的像元大小模型：

$$C_{\text{size}}=\left[\min(M_a_i)\right]^{1/2}$$

式中，M_a_i 是第 i 个专题的最小多边形斑面积。

(5) 边界扩展模型：

If $std_grid=-1$ and $isnull(grid)=1$

$gridll=0$ Else $gridll=gridl$

endif

$gridll$ 为经空间配准后的数据层，它具有和标准层相同的像元数。

3. 可持续发展综合指数的计算

(1) 主因子权重系数模型：

$$W_i=E_i\Big/\sum_{i=1}^{3}E_i$$

式中，W_i 是第 i 个主因子的权重系数；E_i 是第 i 个主因子的特征根值。

(2) 因子得分系数模型：

$$\hat{F}=\begin{bmatrix}\hat{F}_1\\\hat{F}_2\\\vdots\\\hat{F}_k\end{bmatrix}=A\,R^{-1}\,L$$

式中，A 为原始数据库；R 为相关系数阵；L 为因子正交时的因子载荷阵。

(3) CISD 的计算模型：

$$\text{CISD}=\sum_{i=1}^{k}\alpha_i\,f_i$$

式中，α_i 是权重系数；f_i 是第 i 个主因子的特征根值。

土壤流失预测模型

于书霞，王宁，朱颜明等：基于地理信息系统的土壤侵蚀研究．水土保持通报 2001，21(3)

$$A=R\,S_1\,L_s\,C$$

式中，A 为土壤流失模数；R 为降雨侵蚀力因子；S_t 为土壤侵蚀因子；L_s 为平均坡度坡长因子；C 为植被类型因子。

第六章　其他综合模型

树冠中的光线衰减模型

Palmer J W：灌木篱墙苹果园中每日光辐射的中途截留和光辐射中途截留的计算机模型．Journal of Applied Ecology, 1977, 14

假定有一束光线，I_0 在树冠以上，I 在树冠以下，透过灌木篱墙的为：

$$\frac{I}{I_0} = \exp\{-k_1 d[Lk_2k_3 + F/\sin A + k_5(B_1/\tan A + B_2k_4)]\}$$

式中，L、F、B_1 和 B_2 分别是叶片面积，果实面积，垂直树枝面积和水平树枝面积指数；k_1 将这些面积指数化简成密度，并且它依赖于树篱的大小和间距；A 是太阳高度；k_2 和 k_3 是叶片消光系数；k_4 是依赖于 A 的水平圆柱体的消光系数；k_5 是树枝面积的丛生系数。

取样程序

Thompson D C、Klassen G H, Clihlar J：Keewatin, N. W. T. 南部地区驯鹿栖息地绘图-数字 Landsat 数据的应用．Journal of Applied Ecology, 1980, 17

(1) 计算每一个单元中每一种植被覆盖类型的加权平均比所使用的公式：

$$\overline{X}_a = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i W_i}{n}$$

式中，$\overline{X}_a$ 是区域单元中植被覆盖类型 a 的加权平均比；X_i 是植被覆盖类型 a 出现在横断面 i 上的比例；W_i 是由所有横断面的平均长度分割开的横断面 i 的权重因子；n 是横断面的数量。

(2) 加权平均比例的标准差为：

$$S_a = \sqrt{\frac{n}{n-1}\sum_{i=1}^{n} P_i (X_i - \overline{X}_a)^2}$$

式中，S_a 是取样单元中植被覆盖类型 a 的加权平均比的标准差；P_i 是所有横断面的总长度除以横断面 i 的长度计算得到横断面 i 的权重因子。

(3) 复合单元内每种植被覆盖类型的平均比例：

$$M = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i m_i}{A_t}$$

式中，M 是某一复合体中一种植被覆盖类型的平均比例；m_i 是某一单元中一种植被覆盖类型的加权平均比例；A_i 是单元 i 的面积；A_t 是复合体中单元的总面积。

植被冠层模型

Smith J A, Ranson K J, Nguyen D et al：植被冠层模型研究．Remote Sensing of Environment, 1981, 11

(1) 能量平衡框架：

模型把植被冠层抽象为平行的 3 个水平层构成，2 个附加层为冠层上方的大气层和下方的土壤层，对每一层有：

$$\frac{1}{2}\alpha_1\sigma[B(T_a)S_{11} + B(X_1)S_{12} + B(X_2)S_{13} + B(X_3)S_{14} + B(T_g)S_{15}] + A_1 - \sigma B(X_1) + H(X_1;WS,T_a) + LE(X_1;WS,T_a,R_l,RH) = 0$$

$$\frac{1}{2}\alpha_2\sigma[B(T_a)S_{21} + B(X_1)S_{22} + B(X_2)S_{23} + B(X_3)S_{24} + B(T_g)S_{25}] + A_2 - \sigma B(X_2) + H(X_2;WS,T_a) + LE(X_2;WS,T_a,R_l,RH) = 0$$

$$\frac{1}{2}\alpha_3\sigma[B(T_a)S_{31} + B(X_1)S_{32} + B(X_2)S_{33} + B(X_3)S_{34} + B(T_g)S_{35}] + A_3 - \sigma B(X_3) + H(X_3;WS,T_a) + LE(X_3;WS,T_a,R_l,RH) = 0$$

式中，α_i 是第 i 植被层的吸收率；X_i 是第 i 植被层的平均层温；S 是根据冠层几何性质计算的长波通量转移矩阵；A_i 是第 i 植被层的短波吸收系数；$B(X_i)$ 是长波发射的矢量项；$H(X_i)$ 是显热；T_a 是气温；T_g 是土壤温度；WS 是风速；RH 是相对湿度；SW 是短波通量，$LE(X_i)$ 是蒸散项；σ 是 Stefan-Boltzmann 常数。

(2) 每一个能量预算组分的计算公式：

长波吸收：　$B(X_i) = \varepsilon_i (X_i + 273)^4$

短波吸收：　$A_i = ABS(i) \cdot SW$

式中，ε_i 第 i 个层面的发射率，$ABS(i)$ 是短波吸收效率。

热函(sensible heat)：

$$H(X_i;WS.T_a)=h_c(WS)(X_i-T_a)$$

式中，h_c 传导效率。

土壤水分蒸发蒸腾损失总量：

$$LE(X_i;WS,T_a,R,RH)=\frac{1}{R+R_a}[s(X_i)-RHs(T_a)]h(X_i)$$

式中，$h(X_i)$ 是水在温度 X_i 时蒸发的潜伏热；$s(X_i)$ 在树叶温度为 X_i 时饱和情况下在树叶内部的水分蒸发密度；$s(T_a)$是树叶温度超过 T_a 的边界层的自由空气下的水分蒸发密度；R_a 边界层面对水分蒸发扩散的阻抗率。

资源评价模型

刘岳，梁启章：资源数据库的建立及其应用。自然资源，1981，1

$$Y=\sum_{i=1}^{N}W_iX_{i,j}$$

式中，Y 为评价总分；N 为参加评价的要素数量；W_i 为第 i 个要素参加评价的权值；$X_{i,j}$ 为第 i 个要素第 j 个等级的分数值，其中每种要素的等级数 j 是不同的。

数学模型灵敏度

Huson L W：数学模型灵敏系数的定义和特征，Ecological Modelling, 1983/1984, 21

假定有一个数学模型：(y_j) $(j=1,\cdots,v)$，它有 p 个参数 x_i 和 v 个输出变量，定义向量$(\tilde{x}_i;i=1,\cdots,p)$ 为基向量或参数最佳估计值，向量$(\tilde{y}_j;j=1,\cdots,v)$为输出变量的相应向量。一般来讲，通过向 p 个模型参数赋一个联合概率分布值，并用这个分布值产生 n 套参数向量，这 n 个参数向量中每个都可用来产生一个相应的输出向量，由此可以得到用于敏感度分析的数据。$(x_i)_r$ 和$(y_j)_r$ 分别用于表示第 r 个参数向量和它相应的输出向量，依次考查每个向量(y_j)，$(r=1,\cdots,n)$，向每个向量赋予一个值：

$$s_r=\sum_{j=1}^{v}d_j/v$$

式中，当 $|y_j-\tilde{y}_j|<\alpha\tilde{y}_j$，$d_j=0$；当 $|y_j-\tilde{y}_j|>\alpha\tilde{y}_j$，$d_j=1$，向量系数可表达为 $s_\alpha=\sum_{r=1}^{n}s_rw_r\Big/\sum_{r=1}^{n}w_r$，$w_r$ 是一个加权系数，它为向模型输入的 v 个输出变量的 $100\alpha\%$ 敏感系数。

雷达后向散射系数与土壤水分关系模型

Bernard R, Martin P H, Thony J L et al：通过 C 波段雷达确定土壤表层水分。Remote Sensing of Environment, 1982. 12

Dobson 和 Ulaby (1981)的表达式：

$$\sigma_0=-2.849\lg|h|+1.244$$

$$m_{v(0\sim6)}=0.2501-0.0383\lg|h|$$

$$\sigma_0=-1.09(\pm0.01)\lg|h|-1.08(\pm0.04)$$

式中，$m_{v(0-6)}$ 是用经典的瞬时流量法对 0~6 cm 深度内采样的未干扰的土芯测量到的平均体积水分含量。

冬小麦产量县区域尺度的估计模型

Barnett T L, Thompson D R：在小麦产量估计中大面积光谱数据的应用。Remote Sensing of Environment, 1982,12

1978 Texas 冬小麦产量县区域尺度的估计：

$$\hat{Y}=a+b\hat{y}+cI_{green}$$

式中，$\hat{Y}$ 是县小麦产量；$\hat{y}$ 是农业气象学模型的估计结果；I_{green} 是根据 Landsat MSS 数据得到的绿度指数值；a、b 和 c 是回归系数。

产量与胁迫程度-天数的统计关系模型

Hatfield J L：潜在的和实际的农作物产量的遥感估计量。Remote Sensing of Environment, 1983,13

$$Q_{yield}=4024.75-54.2(\sum d_{sd})\quad r^2=0.98$$

此模型野外研究在 California 的 Davis 的一块黏性土上进行。

Suits 模型

Goel N S, Strebel D E：从植被冠层反射模型的反演估计农学变量——I. 问题的定义和利用 Suits 模型得到的最初结果 Remote Sensing of Environment, 1983, 13

(1) 近似辐射传输理论的 3-flux Kubelka-Munk：

$$\frac{dE_-}{dz}=aE_--bE_+-c'E_s$$

$$\frac{dE_+}{dz}=-aE_++bE_-+cE_s$$

$$\frac{dE_s}{dz}=kE_s$$

式中，E_- 和 E_+分别是下行和上行的漫射通量；E_s是镜向或直射通量密度；z 是与冠层垂直的方向，z=0 位于

冠层的顶部，而 $z=-h$ 在土壤的表面，这里 h 是冠层的高度；a 和 b 分别是漫射通量的衰减系数和散射系数，假设对上行和下行方向是一致的；c 和 c' 分别是直射通量转化为上行和下行漫射通量的因子。

$$a \equiv H(1-\tau)+V\left(1-\frac{\rho+\tau}{2}\right)$$

$$b \equiv H\rho+V\frac{\rho+\tau}{2}$$

$$k = H+\frac{2}{\pi}V\tan\theta_s$$

$$c \equiv H\rho+\frac{2}{\pi}V\frac{\rho+\tau}{2}\tan\theta_s$$

$$c' \equiv H\tau+\frac{2}{\pi}V\frac{\rho+\tau}{2}\tan\theta_s$$

$$H \equiv \sigma_n n_h$$

$$V = \sigma_v n_v$$

式中，σ_n 是叶片在水平面上的投影的平均面积；σ_v 是叶片在两个相互正交的垂直平面上的投影的和的平均面积；n_h (n_v)是单位体积中水平(垂直)投影的数量；ρ (τ)是叶片的半球面反射系数(透射率)；θ_s 是入射镜向通量的极化角。

$$l_{la} \cong (h/s)(H^2+V^2)^{1/2}$$

$$\bar{\theta}_l = \arctan(V/H)$$

式中，l_{la} 是叶面积指数；$\bar{\theta}_l$ 是叶片的平均角度；s 是依赖于叶片角分布的修正因子或形状因子。

估计农作物面积的混合模型

Lennington R K, Sorensen C T, Heydorn R P：用 Landsat 数据估计农作物面积的混合模型。Remote Sensing of Environment, 1984, 14

分类的误差或偏差比例：

$$B = P_c(1-\pi)-P_0\pi$$

式中，B 是估计的误差比例；P_c 是委托误差率；P_0 是忽略误差率；π 是真实比例。如果假定对给定的分类器 P_c 和 P_0 是常数，则这个方程预测当π 较小时，则出现正偏差(高估)、当π 较大时，则出现负偏差(低估)。混合模型的数学表述即是，一组数据的属性值的总的分布可通过等价于简单分布的线性组合来描述为 $p(x)=\sum_{i=1}^{M}\lambda_i p_i(x)$，$\lambda_i$ 是类别 i 在混合体中的比例、$p_i(x)$是类别 i 中的概率密度函数、$p(x)$是总的概率密度函数。

植被覆盖土壤的雷达后向散射系数计算公式

Tan M, Schmugge T J, Jackson T J：植被覆盖土壤的雷达后向散射系数的计算。Remote Sensing of Environment, 1984, 15

(1) 植被覆盖土壤的雷达后向散射系数[$\sigma^0(\theta)$]可表示为：

$$\sigma^0(\theta)=\sigma_v^0(\theta)+\sigma_s^0(\theta)e^{-2\tau/\cos\theta}$$

式中，$\sigma_v^0(\theta)$ 是植被后向散射系数；$\sigma_s^0(\theta)$ 是土壤后向散射系数；τ 是植被层的光学厚度；θ 是入射角。

(2) 对粗糙土壤表面，后向散射系数包含两个成分：相干后向散射系数 $\sigma_{coh}^0(\theta)$ 和非相干后向散射系数 $\sigma_{inc}^0(\theta)$：

$$\sigma_{coh}^0(\theta,\phi;\theta_s,\phi_s)=\pi k^2|a_0|^2\delta(q_x)\delta(q_y)e^{-q_z^2\sigma^2}$$

式中，k 是入射波的波数；δ 是 Dirac δ 函数；σ 是表面高度的标准偏差；q_x，q_y，q_z 和 a_0 是参数。

$$\sigma_{coh}^0(\theta)=\int_{\Delta\Omega_s}\sigma_{coh}^0(\theta,\phi;\theta_s,\phi_s)\mathrm{d}\Omega_s=$$

$$4\pi|R_{PP}|^2\cos\theta\, e^{-h\cos^2\theta}$$

式中，$h=4k^2\sigma^2$，$|R_{PP}|^2$ 表示光滑表面的反射率。

$$\sigma_{inc}^0(\theta)=$$

$$(kl)^2\left[|R_{PP}|^2(1+\sin^2\theta)+\mathrm{Re}(R_{PP}R_{PP1}^*)\sin 2\theta\right]\times$$

$$e^{-h\cos^2\theta}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(h\cos^2\theta)^n}{n!n}\exp\left[-\frac{(kl\sin\theta)^2}{n}\right]$$

式中，R_{pp1}^* 是 R_{pp1} 的复共轭。

树高计算公式

Nelson R, Krabill W, Maclean G：利用机载激光数据确定森林冠层特性。Remote Sensing of Environment, 1984, 15

$$h_0=\frac{(H-h-E)d_p}{P+[EP/(H-h)E]+d_p}$$

式中，h_0 是被测量对象的高度；$H-h$ 是在基线的两端上方的飞行高度；E 是被测对象的基准与基线平均基准的海拔高度差值；d_p 是被测对象的顶部与底部的绝对视差的差值；P 是基线的绝对视差。

有限大小农田分类的大气影响纠正模型

Kaufman Y J, Fraser R S：有限大小农田分类的大气影响．Remote Sensing of Environment, 1984, 15

(1) 归一化辐射(I)等价于表观反射，与绝对辐射(I^*)的关系为：

$$I = \pi I^* /(\mu_0 F_0)$$

式中，$\mu_0 = \cos\theta_0$；θ_0是太阳的顶角；F_0是大气层上方与光束正交的单位面积上的太阳辐射。

$$I = I_0 + I_S + I_D$$

式中，I_0是从太阳的直射光束散射而没有经过表面散射，进入探测器的瞬时视场的辐射；I_S是被观察农田反射而直接透射过大气层的辐射；I_D是被观察农田及其背景反射后经过大气层散射到达探测器的辐射。

$$I_s = \frac{\gamma_0 e^{-\tau_0}}{1 - lA_a} A_S$$

式中，γ_0是在农田表面上直射太阳光和天空光线总的下行辐射通量；τ_0是总的大气光学厚度；A_S是农田的反射率；l是大气层从下面的漫反射系数；A_a反射系数是农田与其背景的反射系数的平均值。

$$I_D = \frac{\gamma_0 D}{1 - lA_a} A_D$$

式中，D是穿过大气层到达探测器的漫透射系数；A_D是整个表面的表面反射系数的加权平均值。

(2) 近邻效应表示了非均一面积对辐射的影响，可定义为均一表面(I^u)与非均一表面(I^n)上辐射的差值：

$$\delta I^A = I^n(A_S, A_B, T) - I^u(A_S, A_B, T)$$

式中，A_S和A_B分别是观察农田与其背景的反射系数；T是大气混浊度。

热惯量计算对环境因子变化的敏感性模型

Kahle A B, Schieldge J P, Alley R E：热惯量计算对环境因子变化的敏感性．Remote Sensing of Environment, 1984, 16

(1) 显热通量密度的变化：

$$H = \rho_a c_p C_D W(T_a - T_g)$$

式中，ρ_a是地表空气密度；c_p是干燥空气的定压热容量；C_D是依赖于高度的拖曳系数；W是对阵风进行校正的风速因子；Z是海拔；T_a是地面约 2m 高处的气温；T_g是地面温度。

(2) 海拔对气温(T)、压强(P)、密度(ρ)的影响关系为：

$$T(z,t) = T_0(t) - \Gamma(z - z_0)$$

$$P(z,t) = P_0(t) - \left[\frac{T(z,t)}{T_0(t)}\right]^{c_p/R_a}$$

$$\rho(z,t) = \rho_0(t) - \left[\frac{T(z,t)}{T_0(t)}\right]^{c_p/R_a}$$

式中，下标 0 表示参考海拔高度(z_0)；Γ是干燥绝热气温递减率；c_p是干燥空气的定压热容量；R_a是干燥空气的普适气体常数。

太阳能分布的非线性回归模式

朱志辉：我国太阳能分布的非线性回归模式。地理研究，1984, 3(3)

(1) 回归模型：

$$y = b + \sum_{i=1}^{l}\left(\sum_{j=1}^{5} b_{ij} x_i^j + \sum_{k=i+1}^{l} c_{ik} x_i x_k\right)$$

式中，x_i和x_k为第 i 个和第 j 个基本因子(即根据物理分析和多次筛选得到的对 y 有重要贡献的因子)；b_0，b_{ij}和c_{ik}为待定系数。

(2) 天文辐射月总量：

$$S_0 = \sum_{n=i}^{j}\left\{\frac{T}{\pi} I\left[0.1 + 0.033\cos\left(\frac{2\pi n}{365.24}\right)\right] \times \cos\varphi\cos\delta(\sin\omega_S - \omega_S\cos\omega)\right\}$$

式中，S_0为大气外界水平面上的太阳辐射；n为一年中从 1 月 1 日开始的天数，规定 1 月 1 日 n=1，i 和 j 为某月的头一天的最后一天的天数；T 为日长(1440 分)；I 为太阳常数；φ 为地理纬度；$\omega = \arccos(-\tan\varphi\tan\delta)$为日没时角，$\delta = 23.45°$ 为太阳赤纬。

$$r[\text{弧度}] = r_0 + 0.007\,133\sin r_0 + 0.326\,80\cos r_0 - 0.000\,318\sin[2r_0 + 0.000\,145\cos(2r_0)]$$

式中，$r_0 = \dfrac{2\pi(n + 284)}{365.24}$。

(3) Q 和 S' 的月值计算方程：

$$Q = S_0(0.160 + 0.612x_1 + 0.0384x_1x_2 - 0.00313x_1x_3 - 0.000469x_2x_3)$$

$$S' = S_0(-0.155 + 0.95A + 0.0206x_1x_2 - 0.00416x_3 - 0.000837x_1x_4 - 0.00158x_1x_5)$$

式中，S_0，Q，S' 和 D 为月(或年)总量也可以为月(或年)平均日总量；$A = 0.216 + 0.237x_1 + 0.388x_1^2$，$x_1$ 为月(或年)平均相对日照；x_2 为高度；x_3 为月(或年)平均绝对湿度；x_4 为月(或年)的浮尘日数；x_5 为烟幕日数；S' 为太阳直接辐射。

(4) Q 和 S' 的年值计算方程：

$$Q = S_0(0.191 + 0.579x_1 + 0.0477x_1x_2 - 0.00518x_1x_3 - 0.00198x_2x_3)$$

$$S' = S_0(-0.035 + 0.653x_1 - 0.00560x_1x_3 - 0.00229x_1x_5 - 0.00101x_3x_4)$$

Suits 微分方程与层散射矩阵

W. Verhoef：基于层散射矩阵的地面观测模型. Remote Sensing of Environment, 1985, 17

(1) 关于冠层中均一层的 Suits 微分方程的一般形式为：

$$\mathrm{d}E_s/\mathrm{d}x = kE_s$$

$$\mathrm{d}E_-/\mathrm{d}x = -sE_s + aE_- - \sigma E_+$$

$$\mathrm{d}E_+/\mathrm{d}x = s'E_s + \sigma E_- - aE_+$$

$$\mathrm{d}E_o/\mathrm{d}x = wE_s + vE_- + uE_+ - KE_o$$

式中，x 表示垂直坐标，规定了相对于层的厚度，对层的顶部设为 0，而对层的底部设为−1；E_s 是直射的太阳辐射；E_- 是下行的漫射辐射；E_+ 是上行的漫射辐射；E_o 是在观察方向的辐射乘以 π，或 $E_o = \pi L_o$，L_o 是在观察方向上的辐射；K 是衰减系数。

(2) 层散射矩阵：

如果给定入射通量，则出射通量可计算出来，结果可用矩阵形式表示为：

$$\begin{bmatrix} E_s(-1) \\ E_-(-1) \\ E_+(0) \\ E_o(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{ss} & 0 & 0 & 0 \\ \tau_{sd} & \tau_{dd} & \rho_{dd} & 0 \\ \rho_{sd} & \rho_{dd} & \tau_{dd} & 0 \\ \rho_{so} & \rho_{do} & \tau_{do} & \tau_{oo} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s(0) \\ E_-(0) \\ E_+(-1) \\ E_o(-1) \end{bmatrix}$$

或 $E_{out} = ZE_{in}$

式中，Z 是层散射矩阵。

玉米和大豆生长阶段的估计模型

Badhwar G D, Henderson K E：利用热成像数据估计玉米和大豆生长阶段. Remote Sensing of Environment, 1985, 17

玉米在时刻 t 的生长阶段线性正比于绿色因子时间曲线 $\rho(t)$ 从农作物出土时间 t_0 到 t 对时间的积分面积与从 t_0 到成熟时间 t_s 的积分面积的比值 $\zeta(t)$：

$$\zeta(t) = 1 - \int_t^{t_s} \rho(t')\mathrm{d}t' \Big/ \int_{t_0}^{t_s} \rho(t'')\mathrm{d}t''$$

式中，玉米生长阶段的计算值=1.0+10.0$\zeta(t)$；大豆生长期阶段的计算值=3.0+8.0$\zeta(t)$。

二次样条函数模型

李飞：样条函数在森林群落生物生产力测定中的应用. 自然资源，1985，1

$$y(d) = a_0 + a_1d + \frac{1}{2}a_2d^2 + \frac{\sum b_j(d-\xi_j)_+^2}{2}$$

式中，$\begin{cases} (d-\xi_j)_+^2 = (d-\xi_j)^2 & (d-\xi_j > 0) \\ (d-\xi_j)_+^2 = 0 & (d-\xi_j \leqslant 0) \end{cases}$。

宏观地理系统引水模型

刘昌明，杜伟：系统分析在东线引江水量平衡中的作用. 地理研究，1985，4(3)

(1) 目标函数：水量分配为最优，即引江总补水面积 $D_{i-1(t)}D_{i(t)}y_i$ 为最大：

$$F = \max\left\{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\left[\int_{D_{i-1}}^{D_i}\sqrt{1+\left[\frac{\mathrm{d}P(D)}{\mathrm{d}D}\right]^2}\,y_i\right]_j\right\}$$

(2) 约束方程组：

1) 调水规模：

$$\sum_{i=1}^{n}A_iy_i + \sum_{i=1}^{n}IN_i + \sum_{i=1}^{n}L_i = T$$

2) 各区段农业需水量：

$$A_iy_i \leqslant AN_i \quad (i = 1,2,\cdots,n)$$

3) 环境最大需水量：

$$\sum_{i=1}^{m}\left\{\int_{D_{i-1}}^{D_i}\sqrt{1+\left[\frac{dP(D)}{dD}\right]^2}dDy_i\right\}_i$$

$$\leqslant \sum_{j=1}^{m}\left\{\int_{D_{i-1}}^{D_i}[E_0(D)-P(D)]dD\right\}_{i\leqslant n}$$

4）非负限制：

$$y_i > 0(i=1,2,\cdots,n)$$

式中，D 为从调水点起算的经向投影距离；$D_{i-1}D_i$ 为降水分布函数曲线由 D_{i-1} 到 D_i 的弧长；y_i 为 i 河段引江水的补水深度；A_i 为 i 河段规划设计的农业灌溉面积；IN 为调水沿线总的工业用水量，$IN=IN_1+IN_2+\cdots+IN_i+\cdots+IN_n$，$IN_i$ 为沿干渠第 i 个调水河段的工业用水量；L 为调水沿线水量损失总量，包括蒸发损失和输水损失：$L=L_1+L_2+\cdots+L_i+\cdots+L_n$，$L_i$ 表示第 i 个调水河段的农业灌溉需水量；T 为调水总量；t 为时间；m 为计算时段数。

数学模型的建立及亚热带北界的确定

吴登茹：用模糊数学方法划定陕西省境内的亚热带北界。地理研究，1985，4(3)

(1) 建立因素集：

设 $U=\{u_1,u_2,\cdots,u_n\}$ 是一个因素集，u_i 表示被考虑的因素，$i=1$，2，…，n。

(2) 确定权数分配：

定义 U 上的 Fuzzy 集 A，叫做 U 中因素的权数分配，记为：

$$A=(a_1,a_2,\cdots,a_n)$$

式中，$a_i>0$ 且 $\sum_{i=1}^{n}a_i=1$。

(3) 给出评语集 V：

设 $V=\{V_1,V_2,\cdots,V_m\}$ 是一个评语集，V_j 表示评价的结果，$j=1$，2，…，m。

(4) 确定综合评价转换矩阵 R：

设第 i 个因素的单因素评价为 $R_i=(r_{i1},r_{i2},\cdots,r_{im})$，它可视为 $U\times V$ 上的 Fuzzy 集。r_{ij} 表示第 i 个因素的评价对于 j 等评语的隶属度，n 个因素的综合评价转换矩阵 R：

$$R=\begin{bmatrix}R_1\\R_2\\\vdots\\R_n\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}r_{11}&r_{12}&\cdots&r_{1m}\\r_{21}&r_{22}&\cdots&r_{2m}\\\vdots&\vdots&&\vdots\\r_{n1}&r_{n2}&\cdots&r_{nm}\end{bmatrix}$$

(5) 综合评价计算：

令综合评语 $B=AB$：

$$\mu_B(V_j)=\sum_{i=1}^{n}\mu_A(u_i)\ \mu R_i(u_i,V_j)$$

费用、效益分析计算公式

居焕英：南水北调中线初期引江工程经济效益初探．地理研究，1985，4(3)

(1) 费用计算公式：

$$B=\varphi\ A\ \frac{n_1}{n_2}=\varphi A\varepsilon$$

式中，B 为引江供水经济效益；n_1 为工业净产值与总产值的比重；n_2 为工业固定资产与总产值的比重；φ 为引江输水工程投资转换为固定资产的折算系数；A 为引江输水工程投资；ε 为工业净产值与固定资产的比值。

(2) 综合经济效果静态指标：

$$M_n=\sum_{i=1}^{n}\frac{A_i}{\overline{W_{总}}}\overline{W_n}$$

式中，M_n 为第 n 段分摊的输水工程投资；A_i 为实际使用在的段的输水工程投资；n 为顺着调水方向的总干渠分段排列序号；$\overline{W_{总}}$ 为第 i 段至最终短的总供水量；$\overline{W_n}$ 为第 n 段的供水量。

温度胁迫指数

Gardner B R, Blad B L, Wilson G D：利用冠层温度测量值描述杂交玉米对水分胁迫的灵敏度特性。Remote Sensing of Environment, 1986, 19

$$I_{TS}=T_c-T_m$$

式中，T_c 是指定位置的日中温度值(℃)；T_m 是对特定的杂交玉米产量最高的区域的冠层温度的日中值。

能量平衡法分析模型

Choudhury B J, Idso S B, Reginato R J：利用白天某个时刻的红外温度观测估计小麦地的日蒸发量的阻力 − 能量平衡法分析．Remote Sensing of Environment, 1986, 19 253-268

(1) 蒸发通量(E)给为：

$$E=\frac{\Delta R_n(1-\tau)+DC_p/r_H}{\Delta+\gamma[(r_a+r_c)/r_H]}$$

式中，R_n 是当冠层与空气的温度相等时冠层上方的净辐射；τ 是辐射的透射系数；C_p 是空气的定容热容量；D 是空气中水蒸气压亏值；Δ 是在空气温度处的饱和

水蒸气压曲线的斜率；γ 是湿度计常数；r_H 是热和长波辐射传输的有效动力学阻力；r_a 是热传输的空气动力学阻力；r_c 是蒸发的表面阻力。

$$r_H^{-1} = r_a^{-1} + (C_p / 4\varepsilon_c \sigma T_a^3)^{-1}$$

式中，ε_c 是表面发射率；σ 是 Stefan-Boltzmann 常数；T_a 是空气温度。

$$r_a = \frac{\ln^2[(z-d)/z_0]}{k^2 U} + \frac{1.5\ln[(z-d)/z_0]}{k^2 U}$$

式中，k 是 von Karman 常数；z 是高度；d 和 z_0 分别是零平面位移和粗糙高度；U 是在高度 z 处测量的风速。

$$r_c = \frac{1000[1+(-\psi/230.8)^{5.51}]}{\text{LAI}0.986 + 0.025R_n(1-\tau)}$$

式中，ψ 是叶片水分势，LAI 是叶面积指数。

(2) 蒸发通量另一方面还可用 van den Honert 方程来表示：

$$E = [(\psi_s - \psi)/(R_s + R_p)]L$$

式中，ψ_s 是土壤水分势；R_s 和 R_p 分别是水分从土块中流到根表面的阻力和从根表面到达叶气孔的阻力；L 是体积蒸发热。

(3) 稳定校正空气动力学阻力(r_{ac})的近似方程为：

$$r_{ac} = r_a\left[1 - \frac{5g(z-d)(T_c - T_a)}{U^2 T_a}\right]$$

式中，g 是重力加速度；T_c 是表面温度。

田块尺度农作物分布选择模型

Ferguson M C, Badhwar G D, Chhikara R S et al：美国和加拿大选定农作物的土地尺度分布．Remote Sensing of Environment, 1986, 9

(1) 每一块地的等价长方形的长和宽的表达式为：

$$x = (P \pm \sqrt{P^2 - 16A})/4$$

式中，P 是地的周长；A 是面积；x 的较小值作为宽，较大值作为长。

(2) 反高斯变量 x 的概率密度函数给为：

$$f(x) = (\lambda/2\pi x^3)^{1/2}\exp[-\lambda(x-\mu)^2/2\mu^2 x] \qquad x \geq 0$$

式中，μ 和 λ 与均值和方差相关；$E[x] = \mu$，$Var[x] = \mu^3/\lambda$。

分布函数：

$$F(x) = \phi[(\lambda/x)^{1/2}(-1 + x/\mu)] + e^{2\lambda/\mu}\phi[-(\lambda/x)^{1/2}(1 + x/\mu)]$$

式中，ϕ 是标准正态分布函数

优化土地管理的目标函数

Tercafs R：辅助优化土地管理的计算机系统．Ecological Modelling, 1986, 31

$$H = \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N} A_{ij} \lg A_{ij}$$

式中，A_{ij} 是区域 j 在土地利类型 i 中的比例。

主要限制条件：

(1) 所有土地单元的土地可用性限制：

$$\sum_j A_{ij} \leq 1 \quad \text{对于所有的 } j$$

(2) 每种输出产品的生产力需求限制：

$$\sum_i \sum_j q_{ijk} S_j A_{ij} \geq Q_k \quad \text{对于全部 } k$$

(3) 每种输入产品的资源可用性限制：

$$\sum_i \sum_j q_{ijl} S_j A_{ij} \geq Q_l \quad \text{对于全部 } l$$

式中，S_j 是土地单元 j 中的可用面积；q_{ijk} 是在土地单元 j 中每单位面积的土地利用类型 i 上产品 k 的输出量；q_{ijl} 是在土地单元 j 中每单位面积的土地利用类型 i 上，当输入为 l(能量)时的资源使用量；Q_k 是产品 k 的总生产力需求；Q_l 是可用资源 l 的总量。

微波数据解译影响校正模型

Jackson T J, O'Neill P：利用被动微波传感器对地表土壤水分进行时态观察．Remote Sensing of Environment, 1987, 21

(1) 对表面粗糙度效应进行校正的一个简单模型：

$$e = 1 - (1 - e_R)\exp(-h)$$

式中，e 是平整裸地的发射率；e_R 是粗糙表面的发射率；h 是经验性粗糙度参数。

(2) 植被对土壤水分发射的微波数据解译影响的简单校正模型：

$$e = 1 + (e_v - 1)\exp(bW)$$

式中，e 是裸地的发射率；e_v 是在植被冠层上观测到的微波发射率；W 是植被水分含量；b 是参数。

辐射传输与冠层净光合作用率的评估模型

Choudhury B J：植被指数、辐射吸收及净光合作用率之间的关系及其灵敏度分析评估，Remote Sensing of Environment, 1987, 22

(1) 辐射传输模型：

在冠层中某个水平面向地面的辐照 $F_+(L)$ 及从地面向上的辐照 $F_-(L)$ 可通过下面的公式计算：

$$F_+(L) = S_0\mu_0\exp(-LG_0/\mu_0) + I_1(L)$$

$$F_-(L) = I_2(L)$$

式中，S_0 是辐照在冠层上的辐射；$\mu_0 = \cos\theta_0$，θ_0 是入射顶角；L 是向下的累积叶面积；G_0 是参数；$I_1(L)$ 和 $I_2(L)$ 分别是由于入射的直射辐照和漫射辐照导致的冠层内的漫射辐照。

(2) 冠层净光合作用率：

冠层净光合作用率根据"大叶"模型计算，

$$N_c = L_s P_1(F_{1,s}) + (L_0 - L_s)P_1(F_{1,d})$$

式中，L_s 是阳光照射的叶面积指数，其表达式为 $L_s = \mu_0[1-\exp(-L_0G_0)/\mu_0]/G_0$，$L_0$ 是总的叶面积指数；$P_1(F_{1,s})$ 与 $P_1(F_{1,d})$ 是当辐照 $F_{1,s}$ 和 $F_{1,d}$ 分别入射到阳光照射和荫蔽的叶片上时，叶片的净光合作用率的光响应函数。

(3) 光响应函数是一个经验关系，这里有几个不同的函数关系：

Blackman 函数：

$$P_1(F) = \min[P_{max}, b(F - F_0)]$$

直角双曲函数：

$$P_1(F) = \frac{P_{max}b'(F - F_0)}{1 + b''(F - F_0)}$$

$$P_1(F) = \frac{P_{max}b'F}{1 + b'F} - b''$$

式中，P_{max}，b，b'，b'' 和 F_0 是经验参数。

反射辐射通量密度的理论计算模式

李占清，翁笃鸣：山区短波反射辐射的计算模式．地理研究，1987, 6(3)

$$r'(\psi) = r'p = \frac{1}{\pi}\left\{\Delta h\sum_{q=1}^{mp-1}A_{pq}\,Q_{pq}\left[\sin\alpha\cdot\cos(p\cdot\Delta\psi)\times\cos^2(h_{sp}+q\cdot\Delta h)+\frac{1}{2}\cos\alpha\cdot\sin2(h_{sp}+q\cdot\Delta h)\right]\right.$$
$$+\frac{1}{2}(\Delta h+\Delta h'_p)A_{mp}\cdot Q_{pmp}\times\left[\sin\alpha\cdot\cos(p\cdot\Delta\psi)\times\cos^2(h_{sp}+m_p\cdot\Delta h)+\frac{1}{2}\cos\alpha\cdot\sin2(h_{sp}+m_p\cdot\Delta h)\right]+$$
$$\left.\frac{1}{2}\Delta h'_p\cdot A_{pz'p}\cdot Q_{pz'p}\left[\sin\alpha\cdot\cos(p\cdot\Delta\psi)\cdot\cos2z'_p+\frac{1}{2}\cos\alpha\cdot\sin2z'_p\right]\right\}$$

$$R'_{\alpha\beta} = \Delta\psi\cdot\sum_{P=1}^{N}r'_p$$

式中，α 为计算点所在坡地的坡度；ψ 为以测点所在的坡地方位开始计算的相对方位角；r'_p 为来自 $p\Delta\psi$ 方位上的反射辐射强度；Δh、$\Delta\psi$ 为高度角步长和方位角步长；p，q 为方位角和高度角的循环变量；p 取值是以坡地方位为 0；并按顺时针方向计量，当各要素的下标为 pq 时，表示在 $p\Delta\psi$ 方位、$h_{sp}+g\Delta h$ 高度角的反射面上该要素的值；z'_p 为 $p\Delta\psi$ 方位上的地平遮蔽角；m_p 为在 $p\Delta\psi$ 方位上、整个反射面高度角区间地整划分数，可表达为 $m_p = \mathrm{int}\left[\frac{z'(P\Delta\psi)-h_s(P\Delta\psi)}{\Delta h}\right]$，$\Delta h'_p = z'_p - (h_{sp} + m_p\cdot\Delta h)$，$\Delta h'_p$ 为 $p\Delta\psi$ 方位反射面地整个高度角区间与被整划分地高度区间之差。

半球面的 exitance 实际值(M)与底点辐射(N)的线性回归模型

Middleton E M, Deering D W, Ahmad S P：一个半干旱生态系统的表面各向异性与半球面反射系数．Remote Sensing of Environment, 1987, 23

对 West Texas 6 个不同的自然半干旱植被群落利用 PARABOLA 观察，得到半球面的 exitance 实际值(M)与底点辐射(N)的线性回归模型为：

对可见光：

$$M = 2.94N + 11.91$$

对近红外辐射：

$$M = 3.04N + 18.56$$

Krige 系统方程组

王广德，过常龄："Krige"空间内插技术在地理学中的应用 地理学报，1987，42(4)

$$\sum_{i=1}^{n}\lambda_i\gamma(P_i-P_j)+\sum_{l=0}^{K}\mu_l f^l(P_i)=\gamma(P_i-P_0)$$

$$\sum_{i=1}^{n}\lambda_i f^l(P_i)=f^l(P_0)$$

式中，P_1，P_2，P_3，…，P_n 为所研究区域内的 N 个观测点；$\gamma(h)$ 为任意两点之间距离 h 的函数；λ_i 为权重系数；$f^l(P_i)$ 为 P_i 的 l 阶多项式；μ_l 是拉格朗日乘子。

地表土壤水分的植被指数估计模型

Owe M, Chang A, Golus R E：从卫星微波测量及卫星获取的植被指数估计地表土壤水分．Remote Sensing of Environment, 1988, 24

(1) 前期降水指数(I_{ap})：

基本的 I_{ap} 方程(Saxton 和 Lenz,1967)：

$$I_{apj}=K\left(I_{ap(j-1)}+P_{j-1}\right)$$

式中，下标 j 表示时间；P_{j-1} 是前一天的降水；K 是描述土壤水分损耗率的衰退系数。

$$K=\exp\left[\frac{-E_p}{Z\ (\theta_{fc}-\theta_w)}\right]$$

式中，E_p 是前一天的总的可能蒸散量；Z 是土壤层的深度；θ_{fc} 和 θ_w 分别是土壤饱和值和枯萎点对应的土壤体积水分含量。

(2) 土壤水分(W_s)可近似为：

$$W_s=a_0-a_1e=$$

$$\beta_0-\beta_1 eI_{ndv}+\beta_2 I_{ndv}-\beta_3 e$$

式中，e 是发射率；β_1，β_2 和 β_3 是参数。

实际冠层反射系数

Hope A S：结合遥感光谱反射系数与热观察方法估计小麦冠层的反射系数．Remote Sensing of Environment, 1988, 24

$$r_c=\{[\gamma(e_s^*-e_a)]/[\rho c_p(R_n-G-H)]\}-r_a$$

式中，e_s^* 是在地表温度时的饱和水蒸气压；e_a 是空气中的水蒸气压；r_a 是显热和潜热通量的空气动力学阻力；γ 是湿度计常数；ρ 和 c_p 分别是潮湿空气的密度和定压热容量；R_n 是净辐射；H 是显热通量；G 是地面热通量。

土壤浅表水分的微波测量估计模型

Bruckler L, Witono H, Stengel P：从微波测量估计土壤浅表水分．Remote Sensing of Environment, 1988, 26

(1) 后向散射系数与体积水分含量的关系式：

$$a_1\ \Theta_{0,1}+b_1=\sigma_0$$

$$a_2\ \Theta_{0,2}+b_2=\sigma_0$$

$$\vdots$$

$$a_n\ \Theta_{0,n}+b_n=\sigma_0$$

式中，下标 1 表示第一个回归分析式；下标 n 表示最后一个回归分析式；a 和 b 分别相应于回归式的斜率和截距；$\Theta_{i,i+1}$ 相应于在深度 i 和 i+1 之间的平均体积水分含量；σ_0 是后向散射系数。

(2) 可得下面一组关系式：

$$\Theta_{0,1}=\alpha_{11}\Theta_{0,1}$$

$$\Theta_{0,2}=\alpha_{21}\Theta_{0,1}+\alpha_{22}\Theta_{1,2}$$

$$\vdots$$

$$\Theta_{0,n}=\alpha_{n1}\Theta_{0,1}+\cdots+\alpha_{nn}\Theta_{n-1,n}$$

机载伽马射线雪测量数学模型

Glynn J E, Carroll T R, Holman P B et al：对有深厚积雪的森林覆盖区利用机载伽马射线测量进行雪测量．Remote Sensing of Environment, 1988, 26

(1) 飞机在降雪前的测量的平均计数 $E[N_p]$ 为：

$$E[N_p]=\exp(-\mu_a h)E[N_g]$$

式中，μ_a 是空气中钾或钍的衰减系数($cm^2\cdot g^{-1}$)；h 是飞机下的空气质量；N_g 是地面在 1 秒钟内发射的超过本底值的计数。

(2) 雪测量时的平均计数 $E[N_s]$ 为：

$$E[N_s]=(1-\alpha)E[\exp(-\mu_w d-\mu_a h)N_g]+$$

$$\alpha\exp(-\mu_a h)E[N_g]$$

式中，α 是生物量系数，即由于地面生物量发射导致的降雪前计数所占比例；μ_w 是水中单位钾或钍的衰减系数(mm^{-1})；d(mm)是表示在飞行线上的雪水等价关系的任意变量。

(3) 计算雪水等价(s)的一般公式为：

$$s = \mu_w^{-1}\ln(E[N_p]/E[N_s])$$

$$d_m = \mu_w\sigma^2/2 - \ln\{[\exp(-\mu_w s) - \alpha]/(1-\alpha)\}/\mu_w$$

式中，d_m 是雪水等价的平均值；σ^2 是沿飞行线路的雪水等价的方差。

基于陆地卫星图像的洪水随机模型

熊江波，陈秋峦，陈禹成：陆地卫星图像在洪水随机模型——地貌气候单位线中的试验研究．环境遥感，1988，3(2)

1．洪水随机模型——地貌气候单位线

(1) 洪水过程计算的基本原理：

$$Q(t) = \frac{A_T}{3.6\Delta t}\int_0^t I(t-\tau)u(t)\,dt$$

式中，$Q(t)$ 为出口断面的流量($m^3\cdot s^{-1}$)；$I(t-\tau)$ 为有效降雨($mm\cdot h^{-1}$)；$u(t)$ 为时段单位线(无因次)；Δt 为计算时段(h)；A_T 为流域总面积(km^2)。

(2) 流域地貌规律：

$$\text{河数律}R_B = N_w/N_{w+1}$$
$$\text{河长律}R_L = \overline{L}_w/\overline{L}_{w-1}$$
$$\text{面积律}R_A = \overline{A}_w/\overline{A}_{w-1}$$

式中，R_B，R_L 和 R_A 分别为河数比、河长比和面积比；N_w，$\overline{L}_w$ 和 $\overline{A}_w$ 分别为级别 w 河流数、平均河长和平均汇水面积。

(3) 地貌气候单位线：

$$IUH(t) = \sum_{j=1}^{3}\theta_j(0)\frac{d\phi_{j5}(t)}{dt}$$

$$\begin{cases} \theta_1(0) = R_B^2/(R_A^2 + R_A R_B + R_B^2) \\ \theta_2(0) = \dfrac{R_A R_B}{R_A^2 + R_A R_B + R_B^2}\left[1 - \dfrac{R_B^2 + 2R_B - 2}{R_A(2R_A - 1)}\right] \\ \theta_3(0) = \dfrac{R_A^2}{R_A^2 + R_A R_B + R_B^2}\left[1 + \dfrac{R_B^3 + 2R_B^2 - 2R_B}{R_A^2(2R_B - 1)}\right] \end{cases}$$

$$\begin{cases} \phi_{15}(t) = 1 + A_1 e^{-\lambda_1 t} + A_2 e^{-\lambda_2 t} + A_3 e^{-\lambda_3^* t}\cdot t + A_4 e^{-\lambda_3^* t} \\ \begin{cases} A_1 = \left[(\lambda_3^*)^2(\lambda_1 P_{13} - \lambda_2)\right]\Big/\left[(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3^* - \lambda_1)^2\right] \\ A_2 = \left[(\lambda_3^*)^2\lambda_1 P_{12}\right]\Big/\left[(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3^* - \lambda_2)^2\right] \\ A_3 = \left[\lambda_3^*(\lambda_1\lambda_2 - \lambda_1\lambda_3^* P_{13})\right]\Big/\left[(\lambda_1 - \lambda_3^*)(\lambda_3^* - \lambda_2)\right] \\ A_4 = \left\{(\lambda_3^*)^3\lambda_1 P_{13}(\lambda_3^* - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_3^*) - \left[3(\lambda_3^*)^2 - 2\lambda_2\lambda_3^* - 2\lambda_1\lambda_3^* + \lambda_1\lambda_2\right]\times\left[\lambda_1\lambda_2(\lambda_3^*)^2 - \lambda_1(\lambda_3^*)^2 P_{13}\right]\right\}\Big/\left[(\lambda_3^*)^2(\lambda_1 - \lambda_3^*)^2(\lambda_2 - \lambda_3^*)^2\right] \end{cases} \\ \phi_{25}(t) = 1 - \left[(\lambda_3^*)^2/(\lambda_3^* - \lambda_2)^2\right]e^{-\lambda_2 t} + \left[\lambda_3^*\lambda_2/(\lambda_3^* - \lambda_2)\right]te^{-\lambda_3^* t} + \left[\lambda_2(2\lambda_3^* - \lambda_2)/(\lambda_2 - \lambda_3^*)^2\right]e^{-\lambda_3^* t} \\ \phi_{35}(t) = 1 - \lambda_3^* te^{-\lambda_3^* t} - e^{-\lambda_3^* t} \end{cases}$$

式中，$\begin{cases} P_{12} = (R_B^2 + 2R_B - 2)/(2R_B^2 - R_B) \\ P_{13} = (R_B^2 - 2R_B + 2)/(2R_B^2 - R_B) \\ \lambda_3^* = 2\lambda_3 \end{cases}$；

$\begin{cases} \lambda_3 = v/\overline{L}_3 \\ \lambda_2 = v/\overline{L}_2 = \lambda_3 R_L \\ \lambda_1 = v/\overline{L}_1 = \lambda_3 R_L^2 \end{cases}$；$\theta_j(0)$ 为雨滴在状态 I(级别 I)开始其运动时的概率；$\phi_{j5}(t)$ 为雨滴在状态 i 转移到状态 5(出口断面)的概率函数；P_{ij} 为雨滴由状态 i 到状态 j 的概率；λ_j 为雨滴在河流级别 j 内的平均滞留时间(λ_j^{-1})的倒数(h^{-1})；v 为流域平均流速($m\cdot s^{-1}$)；$\overline{L}_j$ 为河流级别 j 的平均河长(km)；R_A，R_B 和 R_L 定义同前。

2．遥感图像处理和模型参数提取

(1) 河数比 R_B：

$$R_B = N_w/N_{w+1}$$

式中，N_w 为级别 W 的河数。

(2) 河长比 R_L：

$$R_L = \overline{L}_w/\overline{L}_{w-1}$$

$$\overline{L}_w = \frac{1}{N_w}\sum_{i=1}^{N_w} L_{wi}$$

式中，L_{wi} 为级别 W 的第 i 条河流的河长。

(3) 面积比 R_A：

$$R_A = \overline{A}_w / \overline{A}_{w-1}$$

$$\overline{A}_w = \frac{1}{N_w}\sum_{i=1}^{N_w} A_{wi}$$

式中，A_{wi} 为级别 W 的第 i 条河流的汇水面积。

(4) 第三级河流的平均河长 $\overline{L}_3$：

$$\overline{L}_3 = \frac{1}{N_3}\sum_{i=1}^{N_3} L_{3i}$$

式中，L_{3i} 为第三级河流第 i 条河的平均河长；N_3 为第三级河流的河数。

TERSAIL 数值模型

Hope A S, Goward S N, Petzold D E: TERSAIL ——对植被冠层双向反射系数与热发射进行组合分析的数值模型。Remote Sensing of Environment, 1988, 26

(1) TERSAIL 模型：

短波反射系数或漫反射率(α)是在 0.3 ~ 4.0μm 波长范围内对每个波长的加权平均，其值可用 Tergra 公式估计：

$$\alpha = \alpha_1 / (1 + b\sin\beta)$$

式中，b 是依赖于植被结构的常数；β 是太阳的仰角；α_1 是虚设的当 $\beta = 0$ 时的反射系数。

在 SAIL 模型中：

$$\alpha = \sum_{i=1}^{9}(r_i I_i) / \sum_{i=1}^{9} I_i$$

式中，i 标志 9 个相邻的、相同宽度的波段；r 是每个波段的反射系数；I 是相应的入射太阳辐射谱。

(2) 冠层阻力模型：

气孔阻力 r_s 由 Sellers (1985)给出为：

$$r_s = a_2 / (a_3 - IP) + a_4$$

式中，IP 是入射的光合作用有效辐射，a_i 是常数。

叶水分势的修正因子 K_1 为：

$$K_1 = 1 - e^{-b_7 P}$$

式中，当 $K_1 = 0$ 时，$b_7 = dK_1 / d\psi_1$ 及 $P = \psi_1 - \psi_m$；ψ_m 是当 $K_1 = 0$ 时的外推值。

最小冠层阻力 r_{cm} 由下式决定：

$$1/r_{cm} = \sum_{i=1}^{N} 1/(r_{la})_i$$

式中，N 是冠层的分层数；r_{la} 是第 i 层的平均气孔阻力。

Zipf 定则及其广延出的自然资源数量模型

牛文元：Zip 定则及其广延在自然资源数量计算中的应用．自然资源学报，1988，3(3)

(1) Zipf 定则表达式：

$$Z_r = P_0 / r$$

式中，Z_r 代表秩位为 r ($r = 1,2,\cdots$ 按自然数顺序排列)时数量的大小；P_0 为第一秩位($r = 1$)时数量的大小。

(2) Arrhenius-Gleason Model:

$$S = CA^w$$

即　$$\ln S = \ln C + w \ln A$$

式中，$w = f[X_{(u,v,h)}, Y_{(x)}]$；$S$ 代表物种数目；A 代表分布的空间面积；C 为常数；w 为取决于地域空间结构的指数；w 是 X 和 Y 的函数，其中 X 表示空间的地域结构，分别以经度 u、纬度 v 和高度 h 说明之；Y 则表达了与空间 X 相邻地域的作用强度。Arrhenius-Gleason Model 的基本变换很容易被归结到 Zipf 定则的推论之中，并作为该定则的一种注释而闻名。

(3) 城市人口-等级关系模型：

$$P_r^q = P_1 / r$$

即

$$\ln P_1 - \ln r = q \ln P_r$$

式中，P_1 为第一秩位城市的人口数目；P_r 为城市等级为 r 的人口数目；q 为统计意义上的指数。在此模型中，若 $q = 1$，则与 Zipf 定则完全重合。

(4) Clark Model:

Clark Model 从另外一个角度揭示了空间分布与数量排列之间的关系，其表达式为：

$$d_x = d_0 e^{-bx}$$

即

$$\ln d_x = \ln d_0 + (-bx)$$

对于一个地域空间而言，式中，d_x 与 d_0 分别表示距中心某处(x)与地域中心(0)的物质数量，b 为常数。如令 P_m 代表该物质在“各向同性”条件下的总量，即使从 0 到 m 之间的“范围积分”值，并且表达成如下的形式：

$$P_m = \int_0^m d_0 e^{-bx}(\pi 2x)\mathrm{d}x$$

(5) Horton Model:

“Horton Model”是著名的河系等级数量概念的模式，其一般表达方式是：

$$C=(r_{n+1}/r_n)_Q$$

式中，r_{n+1}与r_n分别表示等级为$n+1$与n的各种比较要素；Q代表所要讨论的“比较内容”；C为常数，且由统计分析获得C介于3~5之间。

(6) Bladford Model:

Bladford Model是叙述离散数列分布行为的又一种经验模式，它在科学情报的统计分析中，对于主题论文的分布范围、分布密度以及分布形态，有比较好的解释，该模式使用：

$$r_1:r_2:r_3=1:a:a^2$$

式中，r_1、r_2和r_3表示秩位的增加；a为某个统计常数，在Bladford Model中，a的数值近似地取作5。

植物与大气间的湍流交换模式

陈镜明：植物与大气间的湍流交换——新方法介绍研究状况综述，地理研究，1988，7(3)

1. 局地扩散模式

$$Q_s=-\rho K_s\frac{\partial\bar{s}}{\partial z}$$

式中，Q_s为标量s的垂直通量密度；$\bar{s}$为s的时间平均；$\frac{\partial\bar{s}}{\partial z}$为$\bar{s}$的垂直梯度，$z$为相对地面高度；$K_s$为局地湍流扩散系数。

2. 高阶闭合模式

(1) 二阶矩模式：

$$\frac{\partial\overline{u_i'u_k'}}{\partial t}+\bar{u}_j\frac{\partial\overline{u_i'u_k'}}{\partial x_j}=$$

$$-\underbrace{\left(\overline{u_k'u_j'}\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j}+\overline{u_i'u_j'}\frac{\partial\bar{u}_k}{\partial x_j}\right)}_{(\mathrm{I})}-\underbrace{\frac{\partial\overline{u_i'u_k'u_j'}}{\partial x_j}}_{(\mathrm{II})}-$$

$$\underbrace{\left(\frac{\partial\overline{u_k'P'}}{\partial x_i}+\frac{\partial\overline{u'P'}}{\partial x_k}\right)}_{(\mathrm{III})}+\underbrace{\left(\overline{u_k}\frac{\partial\overline{P}'}{\partial x_i}+\overline{u_i}\frac{\partial\overline{P}'}{\partial x}\right)}_{(\mathrm{IV})}+$$

$$\underbrace{\overline{P'\left(\frac{\partial u_k'}{\partial x_i}+\frac{\partial u_i'}{\partial x_k}\right)}}_{(\mathrm{V})}+\underbrace{\frac{g}{T}\left(\overline{\theta' u_i'}\delta_{k3}+\overline{\theta' u_k'}\delta_{i3}\right)}_{(\mathrm{VI})}-$$

$$\underbrace{v\frac{\partial^2\overline{u_i'u_k'}}{\partial x_j'\partial x_j'}}_{(\mathrm{VII})}-\underbrace{2v\overline{\frac{\partial u_i'}{\partial x_j}\cdot\frac{\partial u_k'}{\partial x_j}}}_{(\mathrm{VIII})}$$

式中，u_i,u_j(i，$j=1$，2，3)为之维风速各分量；P为气压与空气密度之比；θ为位温；T为气温；v为空气运动粘滞系数；δ_{i3}为Kronecker三角；下标k为三维流场种流体变化除i，j外的另外一个自由度($k=1$，2，3)；各变量上方地横线和撇分别为对时间(t)取平均值和相对平均值的脉动。

(2) 高阶闭合模式：

二阶闭合模式：

$$0=-\overline{W}'^2\frac{d\bar{u}}{dz}+2\frac{d}{dz}\left(q\lambda_1\frac{d\overline{u'w'}}{dz}\right)-$$

$$\frac{q}{3\lambda_2}\overline{u'w'}+Cq^2\frac{d\bar{u}}{dz}$$

($i=1$，$k=3$(或$k=1$，$i=3$))

$$0=-2\overline{u'w'}\frac{d\bar{u}}{dz}+\frac{d}{dz}\left(q\lambda_1\frac{d\overline{u'^2}}{dz}\right)+$$

$$2C_dA\bar{u}^3-\frac{q}{3\lambda_2}\left(u'^2-\frac{q^2}{3}\right)-\frac{2}{3}\frac{q^3}{\lambda_3}$$

($i=1$，$k=1$)

$$0=\frac{d}{dz}\left(q\lambda_1\frac{d\overline{v'^2}}{dz}\right)-\frac{q}{3\lambda_2}\left(\bar{v}'^2-\frac{q^2}{3}\right)-\frac{2}{3}\frac{q^3}{\lambda_3}$$

($i=2$，$k=2$)

$$0=3\frac{d}{dz}\left(q\lambda_1\frac{d\overline{w'^2}}{dz}\right)-\frac{q}{3\lambda_2}\left(\overline{w'^2}-\frac{q^2}{3}\right)-\frac{2}{3}\frac{q^3}{\lambda_3}$$

($i=2$，$k=2$)

$$0=-\frac{d\overline{u'w'}}{dz}-C_dA\bar{u}^2$$

($i=1$，$k=3$(或$k=1$，$i=3$))

边界条件：

当$z/h=2$时：

$$\overline{u'w'}/u_*=1$$

$$\overline{u'^2}/u_*=3.5$$

$$\bar{u}/u_*=0$$

当$z/h=0$时：

$$\overline{n'w'}/u_*^2=\left(\frac{ku/u_*}{l_n z/z_0}\right)^2$$

$$\overline{u'^2}/\overline{u'w'}=-3.5$$

$$\overline{v'^2}/\overline{u'w'}=\overline{w'^2}/\overline{u'w'}=1.5$$

式中，$u=u(z)$；$z=h/20$；n 为摩擦速度。

3. 湍流扩散的马尔可夫链模式

$$w(t+\Delta t)=\alpha w(t)+\beta\sigma_w(t)\zeta_n$$

$$Z_P=Z_{P0}+\int_0^t w(t)\,\mathrm{d}t$$

式中，w 为质点的垂直运动速度；σ_w 为 w 的方差；ζ_n 为取决于高斯分布的随机数；α、β 为与涡流时间尺度有关的常数；t、Δt 为时间及其变化；Z_P 为质点在 t 时的空间高度；Z_{P0} 为 $t=0$ 时的质点高度。

产量与辐射截获量关系模型

项月琴，田国良：遥感估算水稻产量——Ⅰ.产量与辐射截获量间关系的研究．环境遥感，1988，3(4)

(1) MIA 地区水稻的叶面积指数轨线 I_{la} 模型：

$$I_{la\,j}=0.947\,90-0.551\,77N_{DD\,j}-1.142\,8N_{DD\,j}^2+1.613\,1N_{DD\,j}^3+0.360\,69N_{DD\,j}^4-0.878\,53N_{DD\,j}^5$$

式中，$N_{DD\,j}$ 为积温经归一化后的值。

(2) 水稻冠层对 PAR 日截获率 I_{PARd} 的模拟计算：

到达冠层内水平面上的光合有效直接辐射 S 和光合有效散射辐射 D 模型：

$$S=S_0\exp(-K\,I_{la})$$

$$D=2D_0\int_0^{\pi/2}\exp(-K\,I_{la})\sin\theta\cos\theta\,\mathrm{d}\theta$$

式中，S_0、D_0 分别为到达冠层上方水平面上的光合有效直接辐射和光合有效散射辐射；K 为植物冠层对太阳直接辐射的减弱系数；θ 为来自天空各部分的散射光线与垂直方向间的夹角。

(3) 从扬花到成熟期内水稻对 PAR 的截获总量和产量的估算：

估算水稻产量 $\hat{Y}$ 模型：

$$\hat{Y}=E_r\,I_{TPAR}$$

式中，E_r 为转换效率；I_{TPAR} 为群体对光合有效辐射的截获总量。

NOAA/AVHRR 资料的订正模型

肖淑招，孟宪钺，张桂宗：NOAA/AVHRR 资料在中小尺度地区进行冬小麦估产的应用研究．环境遥感，1988，3(4)

(1) 绿度总值的校正——各层平均绿度值 A_i 模型：

$$A_i=(M_i-C_i)/E_i$$

式中，M_i 为各层总绿度值；E_i 为各层像元数(不包括空白点)；C_i 为树木、杂草、蔬菜的绿度值，$C_i=\sum_{n=1}^{3}a_{in}$，i 为层的序号 1，2，3，…，n 为树草菜序号 1，2，3，$a_{in}=L_{in}\,a_n/$万亩，L_{in} 分别为树木、杂草、蔬菜的面积；a_n/万亩为每万亩树林、草场和菜园占有的绿度值。

(2) AVHRR 资料的大气影响校正——反射率 R 模型：

$$R\approx\rho\tau+L_P$$

式中，ρ 为地面目标的反射率；τ 为地物和卫星间的大气透过率；L_P 为大气路径辐射。

(3) 区域订正值 B 模型：

$$B=\sum_{i=1}^{n}\Delta G_i/n$$

式中，$\Delta G=\hat{G}-G$，G 和 $\hat{G}$ 分别为植被指数的实际值和理论值。

(4) 积温校正——绿度积温订正值 ΔG_i 模型：

$$\Delta G_i=f\left(\sum T\right)=K_i\,\Delta A_i$$

式中，K 值为建立方程时积温值与预报时积温值之差；ΔA_i 表示每增减1°C 积温时，绿度值的增减值。

叶片指向和叶片反射的镜向成分对冠层双向反射的影响模型

Ross J, Marshak A：叶片指向和叶片反射的镜向成分对冠层双向反射的影响．Remote Sensing of Environment，1989，27

令独立于厚度的函数 $(1/2\pi)g(r_L)$ 为叶片法向指向上半球的分布的概率密度，则：

$$\frac{1}{2\pi}\int_{\Omega_u}g(r_L)\mathrm{d}r_L=$$

$$\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2} g(\vartheta_L,\varphi_L)\sin\vartheta_L d\vartheta_L d\varphi_L = 1$$

假设倾角 ϑ_L 和方位角 φ_L 是独立的，令 $g^*(\vartheta_L)=g(\vartheta_L)\sin\vartheta_L$，叶片的角分布 $g(\vartheta_L,\varphi_L)$ 可给出以下几种形式：

(1) 如所有的叶片具有相同的倾角 ϑ_0，则：

$$g(\vartheta_L)=\delta(\vartheta_L-\vartheta_0)$$

(2) 三角形指向：

$$g^*(\vartheta_L)=a+b\cos2\vartheta_L+c\cos4\vartheta_L$$

(3) Beta 分布：

$$g(\vartheta_L)\backsim\beta(\mu,\upsilon)=\frac{\pi}{2}\frac{x^{\mu-1}(1-x)^{\upsilon-1}}{B(\mu,\upsilon)} \qquad x\in(0,1)$$

式中，$B(\mu,\upsilon)=\Gamma(\mu)\Gamma(\upsilon)/\Gamma(\mu+\upsilon)$ 是 beta 函数，(Γ 是 gamma 函数)。

(4) 叶片反射的镜向成分的贡献：

$$F=\frac{\int_{\Delta\Omega_L} R_F g(r_L)\mathrm{d}r_L}{\Delta\Omega}$$

式中，R_F 是镜向成分的强度。

雪水等价值受森林生物量影响的估计模型

Carroll S S, Carroll T R：通过飞机测量陆地伽马射线辐射估计雪水等价值受森林生物量的影响研究．Remote Sensing of Environment, 1989, 27

(1) 雪水等价值的研究：

空气中伽马射线辐射的衰减可用下面公式很好地近似描述：

$$C_0=\exp(-TH)C_g$$

式中，C_0 是降雪前飞机测量到的伽马射线每分钟的计数；T 是由于空气中钾或钍导致的衰减系数；H 是飞机高度；C_g 是在地面上每分钟的伽马射线计数。

降雪后伽马射线的计数近似为：

$$C=\exp[-(TH+A\cdot E_{sw})C_g$$

式中，C 是在降雪后的条件下飞机上测量到的每分钟后伽马射线的计数；A 是水的辐射衰减系数；E_{sw} 是雪层的雪水等价值。

(2) 森林生物量的影响：

如果存在生物量，伽马射线的计数的背景值是：

$$C_0=\exp(-TH-10AG)C_g-\exp(-TH)P\cdot G\cdot C_g$$

式中，G 是地面上绿色生物量的权重；P 是 1g 绿色生物量中钾含量与 20 cm^3 表层上中钾含量比值。

雪后伽马射线的计数率为：

$$C=\exp(-TH-10AG-A\cdot S_{WE})C_g+$$
$$\exp(-TH)P\cdot G\cdot C_g$$

基于知识库系统方法的流域酸化模型

Lam D C L, Swayne D A, Storey J et al：使用基于知识库系统方法的流域酸化模型．Ecological Modelling, 1989, 47

(1) 稳定态碱度模型(k_{al})：

阳离子剥蚀率模型(Henriksen, 1982；Thompson, 1982)：

$$k_{al}=k_{al0}-\Delta k_{al}$$

式中，k_{al0} 是初始的碱度；Δk_{al0} 是酸性物质沉积导致的碱度的变化。

$$\Delta k_{al}=(D/R)(1-F)$$

式中，D 是每年硫酸盐的酸性沉积；R 是每年的径流量；F 是与 k_{al0} 相关的经验因子。

(2) 滴流(TD)模型(Schnoor 等, 1986)：

在这个模型中，稳定态碱度 k_{al} 为：

$$k_{al}=(I/Q)(W/(0.1P)-L)$$

式中，I 是流入量；Q 是流出率或渗流率；W 是侵蚀和中和率；P 是降水率；L 是降水的总酸度。

水稻产量的遥感资料估算模型

田国良，项月琴：遥感估算水稻产量——II.用光谱数据和陆地卫星图像估算水稻产量．环境遥感, 1989, 4(1)

(1) 叶面积指数 I_{la} 的估算模型：

$$I_{la}=\frac{1}{K}\ln\left[\frac{R_\infty-R_s}{R\infty}-R(I_{la})\right]$$

(2) 总的截获光合有效辐射 I_{TPAR} 和产量 Y 的估算模型：

$$I_{TPAR}=535.98(1-e^{-0.4422I_{la}})(\mathrm{t\cdot hm^{-2}})$$

$$Y=11.256(1-e^{-0.4422I_{la}})(\mathrm{MJ\cdot m^2})$$

水资源的均衡状态与决策模型

孙云伟，杜国恒：水资源的状态与决策．自然资源，1989，1

(1) 水资源均衡关系模型：

$$F_i\mu_i\frac{dX_i}{dt}=\sum_{J=1}^{n}\frac{X_J-X_i}{L_{iJ}}K_{iJ}B_{iJ}M_{iJ}+\alpha_i PF_i+$$

$$\sum\frac{U_{1i}}{1-\beta_K L_{Ki}}\gamma-U_i+\gamma_{i1}U_{1i}+\gamma_{i2}U_i$$

式中，X_i 为第 i 子系统地下水位，作系统状态变量；dX_i 为第 i 子系统水位变化值，向下为正；U_{1i} 为第 i 子系统地表水引用量，作决策变量；X_J 为与 i 子系统相接的第 J 子系统地下水水位；K_{iJ} 为第 i 子系统与第 J 子系统之间的渗透系数；B_{iJ} 为第 i 子系统与第 J 子系统之间的接壤长度；M_{iJ} 为第 i 子系统与第 J 子系统之间的接壤含水层厚度；α_i 为第 i 子系统降水入渗系数；F_i 为第 i 子系统面积；β_K 为第 K 子系统引水子 i,K 之间单位长度的损失系数；L_{Ki} 为第 K 子系统引水子 i,K 之间的长度；r 为有效入渗系数；U_i 为开采量，作决策变量；P 为降水量的决策变量。

(2) 目标函数模型：

$$\max z=\sum_{i=1}^{n}X_i+\sum_{i=1}^{n}X_{1i}$$
$$i=1,2,\cdots,n$$

式中，X_i 为第 i 个节点地表引水量；X_{1i} 为第 i 个节点地水开采量。

(3) 水资源控制系统模型：

$$X(t)=e^{At}X_0+\int_0^t e^{A(t-\tau)}BU(\tau)d\tau$$

式中，$X(t)$ 为状态向量；$U(\tau)$ 为决策向量；A,B 为系数矩阵；X_0 为初始状态向量。

从定性向定量转化的判别决策函数模型

丁跃民，赵元洪：陆地卫星 MSS 图像与地学资料的综合处理及计算机成矿预测．环境遥感，1989，4(1)

$$S=\sum_{j=1}^{P}\delta_j\cdot b_j=A^{\mathrm{T}}\cdot B$$

式中，$A=(\delta_1\delta_2\cdots\delta_p)^{\mathrm{T}}$，是某待判单元在 P 个定性变量上取值的向量；$B=(b_1b_2\cdots b_p)^{\mathrm{T}}$，为决策系数；$S$ 为待判单元的判别得分。

蓄积损失估测模型

赵宪文，李继泉：用 SPOT 卫星影像研究阿木尔林业局森林火灾损失．环境遥感，1989，4(2)

$$\bar{y}=\sum_{h=1}^{J}W_h\,\bar{y}_h$$

式中，W_h 为第 h 层的权重；$\bar{y}_h$ 为第 h 层每公顷蓄积量样本平均数；J 为层数。

水质变化趋势及其成因分析公式

唐以剑，章申：我国发展中的水环境问题与对策．地理学报，1989，44(3)

(1) 环境污染与人口与生产发展的关系：

$$I=PAT$$

式中，I 为人对环境的影响程度；P 为人口变化因子；A 为富裕变化因子；T 为技术变化因子。

(2) 几个能代表我国主要水域的湖泊和水库的水质污染与人口和工农业生产发展水平、水量变化与治理等因素之间的关系：

位于长江中游的洞庭湖水 COD 的变化模式为：

$$Y=0.734\,38+0.000\,81x_1+0.007\,95x_2-0.036\,26x_4$$
$$(r=0.876,\quad n=10)$$

位于淮河流域中游的洪泽湖 COD 的变化为：

$$Y=9.137+0.000\,87x_1+0.009\,9x_2-0.486\,6x_4$$
$$(r=0.96,\quad n=11)$$

处于东北松花江支流上的镜泊湖的 COD 的变化为：

$$Y=61.669\,5+2.749\,9x_2-3.082\,3x_3-0.178\,12x_4$$
$$(r=0.84,\quad n=8)$$

地处干旱区的新疆石河子市附近的蘑菇湖水库 COD 的变化为：

$$Y=-7.301\,5+0.273\,6x_1+3.194\,6x_2+25.862\,8x_5$$
$$(r=0.98,\quad n=8)$$

式中，Y 为水域中污染(COD)浓度的变化($mg\cdot L^{-1}$)；x_1 为流域范围内人口的变化(万人)；x_2 为流域范围内工业产值的变化(亿元 $\cdot a^{-1}$)；x_3 为流域范围内农业产值的变化(亿元 $\cdot a^{-1}$)；x_4 为水域中的水位的变化(m)；x_5 为水域中污水的排入量($10^8 m^3\cdot a^{-1}$)。

水文时间序列不均匀系数的分析与计算模型

周成虎，汤奇成：水文时间序列不均匀系数的分析与计算. 自然资源，1989，4

（1）水文时间序列不均匀系数C_l模型：

$$C_l = -\left[\sum_{i=1}^{l} X_i + \sum_{i=k-1}^{n} X_i - (n-k-l)\overline{X}\right] \Big/ (n\overline{X})$$

式中，X_i为所时间而变化的时间序列；$\overline{X}$为序列的均值；$i=1,2,\cdots,n$。

（2）年径流不均匀系数的计算模型：

$$C_l = \left(\sum_{m=1}^{k} Q_{\mathrm{m}} - kQ_0\right) \Big/ (12Q_0)$$

式中，Q_{m}为大于年平均流量值的月平均流量；k为月平均流量超过年平均流量的月数；Q_0为年平均流量。

环境对区域丰度的影响模型

Smith M O, Ustin S L, Adams J B et al: 沙漠中的植被——Ⅱ. 环境对区域丰度的影响. Remote Sensing of Environment, 1990, 29

（1）植被覆盖(VF_{s})度计算公式：

$$VF_{\mathrm{s}} = -0.04 + 1.50\text{cover}$$

式中，VF_{s}是图像平面上的植被冠层投影的比例；"cover"是在野外利用直线截矩样条区估计的比例。

（2）温度-海拔关系：

对从 Big Pine 到 Lone Pine 的 Sierran 冲积平原，辐射温度($\overline{T_{\mathrm{s}}}$)与海拔($E$)之间的具有很好的相关关系：

$$\overline{T_{\mathrm{s}}} = 41 - 0.012E$$

（3）植被-海拔关系：

$$\overline{VF_{\mathrm{s}}} = -0.20 + 0.000\,27E$$

燕麦地微波辐射的季节性演化模型

Mätzler C: 燕麦地微波辐射的季节性演化. Remote Sensing of Environment, 1990, 31

（1）辐射测量模型：

近地观测中反射率与亮度温度T_{p}的联系可表示如下：

$$r_{\mathrm{p}} = \frac{T - T_{\mathrm{p}}}{T - T_{\mathrm{s}}}$$

式中，T是物理对象的温度；T_{s}是天空的有效亮度温度；下标p表示偏振($p=h$表示水平偏振，$p=v$表示垂直偏振)。

（2）由于植被导致的微波衰减：

在低频段，空气-植被混合体表现为一个存在损耗的具有负散射的介电质，植被的主要效应是衰减效应之一，在层状介电质中衰减规律为：

$$r_{\mathrm{h}} - r_{\mathrm{v}} = \Delta r_0 \ \exp(-2\tau_0 / \cos\theta)$$

$$\tau_0 = \alpha d_{\mathrm{w}}$$

式中，Δr_0是植被衰减为0时土壤表面的极化差；τ_0表示植被层的最低点的不透明度；θ是入射角；α是植物水分的吸收系数；d_{w}是植物水分含量。

土壤有机物成分对土壤微波发射影响的观测模型

O'Neill P E, Jackson T J: 土壤有机物成分对土壤微波发射影响的观测效果. Remote Sensing of Environment, 1990, 31

（1）土壤层的介电特性：

$$k = \frac{3k_{\mathrm{c}} + 2(1-f_{\mathrm{c}})(1-k_{\mathrm{c}})}{3 + (1-f_{\mathrm{c}})(k_{\mathrm{c}} - 1)}$$

式中，k是土壤聚集体与孔隙构成的土壤层的介电常数；k_{c}是土壤聚集体的介电常数；f_{c}是土壤聚集体占据的体积比例。

（2）土壤聚集体的体积密度的估计基于土壤纹理及当前有机物的量：

$$\rho_{\mathrm{c}} = \frac{100}{(X/\rho_0) + [(100 - X)/\rho_{\mathrm{m}}]}$$

式中，ρ_{c}是聚集体的体积密度($\mathrm{g \cdot cm^{-3}}$)；X是有机物的重量百分比；ρ_0是有机物的平均体积密度；而ρ_{m}是无机物的体积密度。

（3）在 1.4 GHz 水平极化方向，及 10° 观察角上的微波发射可用 Fresnel 方程进行计算预报：

$$R(\theta, H) = \left(\frac{k\cos\theta - \sqrt{k - \sin^2\theta}}{k\cos\theta + \sqrt{k - \sin^2\theta}}\right)^2$$

式中，R是入射角为θ的水平极化方向上微波反射率。

净辐射和土壤热通量的谱估计模型

Daughtry C S T, Kustas W P, Moran M S et al: 净辐射和土壤热通量的谱估计. Remote Sensing of Environment, 1990, 32

（1）净辐射(R_{n})：

$$R_{\mathrm{n}} = R_{\mathrm{Si}} - R_{\mathrm{So}} + R_{\mathrm{Li}} - R_{\mathrm{Lo}}$$

式中，下标S和L分别表示太阳辐射和长波辐射；下

标 i 和 o 分别表示相对于表面的入射和出射通量。

(2) 辐射项的估计：

净辐射方程可改写为：

$$R_n = R_{Si} - R_{So} + e_a\sigma T_a^4 - e_s\sigma T_s^4$$

式中，e_a 是无云天空的有效发射率；σ 是 Stefan-Boltzman 常数；T_a 是空气温度；e_s 是表面发射率；T_s 是表面温度

对植被覆盖表面，Brest 和 Goward (1987)用下式计算 R_{So}：

$$R_{So} = R_{Si}(0.526\text{B1} + 0.418\text{B3})$$

对裸露表面：

$$R_{So} = R_{Si}(0.526\text{B1} + 0.474\text{B3})$$

式中，B1 和 B3 表示 Exotech 100 辐射计在 SPOT 波段测量到的反射系数因子。

(3) 入射长波辐射(R_L)用一个 Eppley 精度红外辐射计测量。

Idso-Jackson 公式：

$$R_{Li} = \sigma T_a^4\{1 - 0.261\exp[-7.77\times10^{-4}(273 - T_a)^2]\}$$

Brutsaert 公式：

$$R_{Li} = (\sigma T_a^4)1.24(e_0 / T_a)^{1/7}$$

Satterlund 公式：

$$R_{Li} = (\sigma T_a^4)1.08[1 - \exp(-e_0 T_a / 2016)]$$

(4) 土壤热通量：

土壤热通量的遥感值(G)利用下面的包含 R_n 的遥感值的函数的三个方程计算：

$$G = (0.295 - 0.0133 d_{irre})R_n$$

$$G = (0.294 - 0.0164 d_{irre})R_n$$

$$G = (0.325 - 0.208 I_{ndv})R_n$$

式中，d_{irre} 是 B3 和 B2 这两个反射系数因子的比值，I_{ndv} 是利用 B3 和 B2 这两个反射系数因子求得的归一化差植被指数。

显热通量密度的涡度相关法测量与空气动力学粗糙度参数估计模型

Matthias A D, Kustas W P, Gay L W et al: 玉米动苗及垄状土壤组成的植被稀疏粗糙表面的空气动力学参数. Remote Sensing of Environment, 1990, 32

(1) 显热通量密度的涡度相关法测量：

一维涡度相关方法可定出垂直紊动的显热通量密度(H, W · m^{-2})：

$$H = \rho c_p \overline{w'T'}$$

式中，ρ 是空气密度；c_p 是空气的定压热容量；w' 和 T' 分别是垂直方向上的平均风速和空气温度的瞬时偏离；上横杠表示对 w' 和 T' 偏离值乘积进行时间平均。

(2) 用能量平衡波文比方法测量蒸发通量密度

蒸发通量密度(E)可用下式计算：

$$E = \frac{-(R_n + G)}{L(1 + \beta)}$$

式中，R_n 是净辐射；G 是土壤热量通量密度；L 是蒸发热；β 是波文比。

$$\beta = \frac{c_p}{L}\frac{(T_2 - T_1)}{(q_2 - q_1)}$$

式中，T 是干球空气温度；q 是定量湿度；下标 2 和 1 分别表示干湿温度计的上限值和下限值。

(3) 空气动力学粗糙度参数估计：

在近中性条件下，平均水平风速(u)可设为：

$$u = \frac{u_*}{k}\ln\frac{z - d_0}{z_0}$$

式中，z 是表面上空惯性层中的高度；u^* 是摩擦速度，$u^* \equiv (\tau/\rho)^{1/2}$；$\tau$ 是表面切应力；k 是无量纲 von Karman 常数；z_0 是动量的粗糙长度；d_0 是零平面位移高度。

Monin-Obukhov 稳定性参数可表示为：

$$\zeta = \frac{z_r - d_0}{L_0}$$

式中，z_r 是参考高度；而 L_0 是 Obukhov 稳定性长度，且定义为：

$$L_0 = \frac{u_*^3\rho}{kg[H / T_a c_p + 0.61E]}$$

式中，g 是重力加速度；T_a 是在高度 z_r 处的空气温度；E 是水蒸气通量密度。

绝对水分浓度的计算公式

Barnes F J, Karl R J, Kunkel K E et al：利用激光雷达确定玉米上方水蒸气水平及垂直方向上的变化，Remote Sensing of Environment, 1990, 32

在沿激光束方向每 1.5m 间隔内，绝对水分浓度(分子数 cm^{-3})可表示为：

$$[H_2O]_R = [N_2]_R \times (\sigma_{N_2} / \sigma_{H_2O}) \times [P(\lambda_{H_2O}, R) / P(\lambda_{N_2}, R)] \times K$$

式中，$[N_2]_R$ 是沿激光束方向的 R 中的所有点的氮分子密度；R 是激光束的范围；σ 是 Raman 散射截面，σ_{H_2O} 表示水分子；σ_{N_2} 表示氮分子；$P(\lambda, R)$ 是氮(λ_{N_2})和水(λ_{H_2O})在范围 R 中在波长 λ 接收到的光能；K 表示望远镜的传输、反射和接收的灵敏因子。

农业气象模型

Rudorff B F T, Batista G T：基于农业气象-光谱模型的甘蔗产量估计，Remote Sensing of Environment, 1990, 33

最大产量可表示为相对蒸散量的亏值的函数：

$$1 - Y_e / Y_m = k_y (1 - ET_a / ET_m)$$

式中，Y_e 是估计产量；Y_m 是最大产量；k_y 是产量响应因子；ET_a 是实际蒸散量；ET_m 是最大蒸散量。

利用线性多变量回归分析可把从 Landsat 观测数据得到的植被指数与基于农业气象模型得到的产量估计整合到一起，而得到估计甘蔗产量的组合模型：

$$Y = a_0 + a_1 I_{rv} + a_2 Y_e$$

式中，Y 是根据组合模型估计的甘蔗产量；I_{rv} 是比例植被指数；a_0，a_1 和 a_2 是回归参数。

针叶林冠层间隙概率的辐射测量模型

Albers B J, Strahler A H, Li X et al：针叶林冠层间隙概率的辐射测量，Remote Sensing of Environment, 1990, 34

(1) 负指数衰减：

下行直接辐射通量(I)的 Kubelka-Monk 方程：

$$I = I_0 e^{-kn}$$

式中，I_0 是总的入射辐射通量；k 是介质的吸收系数；n 是累积叶面积指数。

镜向光线经过一个叶片随机分布的植被冠层的衰减方程为：

$$I = I_0 e^{-qn\sec\gamma}$$

式中，q 是依赖于叶片倾斜及太阳顶角 γ 的吸收系数、后向散射及前向散射系数的总和。

DeWit (1965) 推导出一个顶角为 θ 时太阳光斑透射的负指数函数：

$$S = e^{-LG/\cos\theta}$$

式中，S 是太阳光斑透射的比例；其依赖于累积叶面积系数(L)和单位叶面积在与顶角 θ 正交的平面的投影值 G。

一束辐射波穿过一个冠层照到地面的一点(x, y)上而不被吸收的概率 P 为：

$$P(x, y, S) = e^{-kpS}$$

式中，k 是叶面积在辐射源方向的投影面积的比例；p 是叶密度；S 是辐射束在冠层中经过的路径的长度。

(2) Li-Strahler 间隙概率模型：

间隙概率：

$$P_{gap}(s) = e^{-kLs/D} = e^{-\tau s}$$

式中，s 是路径长度；L 是在以冠层的基面积划分的某个冠层包络体中所有叶片的单面面积；D 是冠层包络体的平均厚度；k 是衰减系数，其值由叶片的角度分布及叶片的透射率决定。

平均间隙概率可模拟为：

$$\overline{P}_{gap}(\theta) = \frac{1}{A} \iint_A e^{-\tau s(x,y,\theta)} dx dy$$

式中，A 是整个区域；A 是面积；(x,y) 是 A 中的点。

环境因子的多元回归分析模型

李芝喜：利用遥感技术进行大熊猫栖息环境的调查研究，环境遥感，1990，5(2)

(1) 多元线性回归模型：

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_m x_m + \varepsilon$$

式中，y 为因变量，反映环境质量的单位面积主食竹标准株的数量；$\beta_j (j = 1, 2, \cdots, m)$ 为偏回归系数；β_0 为常数项，其他项均为待估计的参数；$x_j (j = 1, 2, \cdots, m)$ 为自变量，可从航空像片上判读的环境因子的赋值；ε 为随机误差。

(2) 显著性检验模型：

$$F = \frac{u/m}{Q/n - m - 1}$$

式中，$Q=\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2$ 为剩余离差平方和；$u=\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i-\bar{y})^2$ 为回归离差平方和。

(3) 复相关系数模型：

$$R=\sqrt{\frac{u}{S_{yy}}}=\sqrt{1-\frac{Q}{S_{yy}}}$$

式中，$S_{yy}=\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2=Q+u$ 为总的离差平方和；Q 和 u 同上。

(4) 剩余标准差模型：

$$S=\sqrt{Q/n-m-1}$$

遥感图像因子分析的理论模型及算法

王铮，梅安新，刘树人等．遥感图像因子分析的环境意义．环境遥感，1990，5(3)

(1) 从 Z 到 L 的变换模型：

$$Z=LA$$

式中，Z 为 $N_1N_2\times n$ 的阵；L 为 $N_1N_2\times m$ 的阵；A 为 $m\times n$ 的阵；N_1N_2 为像元数；N_1 为行数；N_2 为列数；m 为景观空间 L 的基，即环境因子数；n 为遥感器的通道数。

(2) 遥感图像模型：

$$Z(u,v)=C(\lambda)\frac{1}{N_1N_2}\times\sum_{j=0}^{N_1-1}\sum_{k=0}^{N_2-1}F(j,k)\exp\left[2\pi i\left(\frac{j}{N_1}+\frac{k}{N_2}\right)\right]f_S(j,k)$$

式中，$C(\lambda)$ 为传输因子，表示传感器关于中心波长 λ 的传输特性；$f_S(j,k)$ 为遥感器的传递函数，可表示为 $f_s(j,k)=\frac{N_1N_2}{\pi jk}\sin\frac{\pi}{N_1}j\sin\frac{\pi}{N_2}k$。

功率谱分析中几个重要公式

王强，么枕生：功率谱分析中几个重要问题的讨论．地理学报，1990，45(3)

(1) 功率谱估计量：

$$\hat{G}(f)=\sum_{k=-M}^{M}\hat{R}(k)\cos 2\pi kf$$

式中，$\hat{G}(f)$ 功率谱估计量；$M=2\sqrt{N}$ 为最大后延，N 为样本长度；f 为频率；

$$\hat{R}(k)=\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N-|k|}x_t x_{t+|k|}$$

(2) 功率谱：

$$I(\omega)=\frac{1}{4(\omega_0-\omega)^2}[e^{-i(\omega_0-\omega)t_0}-1]+\frac{e^{-2\varphi i}}{4(\omega_0^2-\omega^2)}[e^{i(\omega_0-\omega)t_0}-1]\times[e^{i(\omega_0-\omega)t_0}-1][e^{i(\omega_0-\omega)t_0}-1]+\frac{1}{4(\omega_0+\omega)^2}[e^{i(\omega_0+\omega)t_0}-1][e^{-i(\omega_0-\omega)t_0}-1]+\frac{e^{2\varphi i}}{4(\omega_0^2-\omega^2)}[e^{i(\omega_0-\omega)t_0}-1][e^{-i(\omega_0-\omega)t_0}-1]$$

测定农田蒸发的计算方法

谢贤群：测定农田蒸发的实验研究．地理研究，1990，9(4)

(1) 波文比-能量平衡法：

$$\lambda E=\frac{R_n-G}{1+\frac{C_p\cdot P}{\varepsilon\cdot\lambda}\cdot\frac{K_H}{K_W}\cdot\frac{\partial T/\partial z}{\partial e/\partial z}}=\frac{R_n-G}{1+\beta}$$

式中，λE 为蒸发耗热通量；R_n 为净辐射通量；G 为土壤热通量；ε 为水汽分子对于空气分子的重量比；C_p 为空气定压比热；P 为大气压力；λ 为气化潜热；K_H 和 K_W 分别为显热和潜热的湍流交换系数；$\partial T/\partial z$ 和 $\partial e/\partial z$ 分别是空气温度和水汽压的垂直梯度；β 为波文比。

(2) 空气动力学抗阻-能量平衡法：

1) 基本公式：

$$\lambda E=R_n-G-\rho C_P\frac{T_c-T_a}{r_a}$$

式中，T_c 为作物表面温度；T_a 为空气温度；v 为中性层下的空气动力学抗阻。

2) 陈镜明剩余抗阻公式：

$$\lambda E=R_n-G-\rho C_P\frac{T_c-T_a}{r_{bH}-r_{ac}}$$

$$r_{bH}=7.5\left(\bar{l}/\bar{U}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$r_{ac}=r_{am}\phi_H$$

式中，r_{bH} 为剩余抗阻；$\bar{l}$ 为作物叶子特征尺度；$\bar{U}$ 为作物冠层内的平均风速；r_{am} 为中性层结下的空气动

力学抗阻；ϕ_H 为层结稳定度的订正函数。

3）谢贤群改进公式：

$$r_{ac} = r_{am} + \frac{\phi H}{u_* K} = r_{am}\left(1 + \frac{\phi H}{\ln\frac{z-b}{z_0}}\right)$$

式中，r_{ac} 为经过层结稳定度订正后的空气动力学抗阻；z_0 为下垫面粗糙度；k 为卡尔曼常数；u_* 为摩擦速度；d 为零平面位移。

(3) 空气动力学技术-多层梯度法：

$$\lambda E = -u_*^2 \lambda \frac{dq}{du}$$

$$H = -\rho C_P u_*^2 \frac{dT}{du}$$

$$u_* = k(z-d)\frac{du}{dz} / \phi_m$$

式中，z 为参考高度；d 为零平面位移；dq，dT，du 分别为水汽、温度和风速随高度的变化；ϕ_m 为动量交换的稳定度订正函数；H 为显热交换通量；ρ 为空气密度。

(4) 大田水量平衡法：

$$P + I + E_g = R_s + P_a + P_i + E \pm \Delta W_s$$

式中，P 为降雨量；I 为实测各抽水点的灌水量；E_g 为日潜水蒸发量；R_s 为农田的地表径流；P_a、P_i 分别为降雨和灌溉补给地下水量；ΔW_s 为土壤水分变化量；E 为 5 日时段内农田实际蒸发量。

(5) 红外遥感模式：

$$\lambda E = \frac{\rho C_P}{\gamma}\left[\Delta(T_0 - T_a) + d\right] \Bigg/ \left(r_a + \frac{1 + \frac{T_d - T_0}{T_d - T_w}}{AI + BQ_{no}}\right)$$

式中，λ 为干湿表常数；Δ 为空气温度下的饱和水汽压斜率；T_0 为作物活动面温度；d 为水汽饱和差；r_a 为空气抗阻；T_d 为不灌水条件下的作物冠层温度；T_w 为充分灌水时作物冠层温度；I 为用作物光谱推算出的叶面积指数；Q_{no} 为作物活动面上的光辐射强度；A 和 B 为待定系数。

区域玉米水分状况估计模型

Seguin B, Lagouarde J P, Savane M：从气象卫星的热红外数据估计区域玉米水分状况. Remote Sensing of Environment, 1991, 35

(1) 对大的空间尺度提出了一个思想，即日蒸散量 ET_d 与日累积净辐射 R_{nd} 和 $T_s - T_a$ 的日中值之间存在联系：

$$ET_d = R_{nd} + a - b(T_s - T_a)$$

式中，T_s 是地表温度；T_a 是大气温度；a 和 b 是校正常数。

每日的值对 n 天的累积为：

$$\sum_0^n ET_d = \sum_0^n R_{nd} + na - b\sum_0^n (T_s - T_a)$$

(2) 对长时段(如 1 个月或更长)，可得到下面的式子：

$$ET = R_n - b\sum(T_s - T_a)$$

在这样的时间尺度上，我们知道区域 ET 的与局部的可能蒸发量 PET 存在如下关系：

$$ET + PET = 2PET_0$$

式中，PET_0 是潮湿条件下的参考 PET，其可近似表示为在自由对流条件下的 Priestley 和 Taylor 方程：$PET_0 = \alpha\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}R_n$，$\Delta$ 是饱和水蒸气压曲线的斜率，γ 是湿度计常数，α 是 Priestley-Taylor 系数；$PET = \left(2\alpha\frac{\Delta}{\Delta+\gamma} - 1\right)R_n + b\sum(T_s - T_a)$，$R_n$ 是净辐射；b 是参数。

(3) 归一化日胁迫度：

$$\frac{b\sum(T_s - T_a)}{R_n} = r$$

(4) 在农业气象或天气大尺度模型中衡量水分胁迫状况的简单方法：

$$\frac{ET}{R_n} = 1 - r$$

$$\frac{ET}{PET} = \frac{1-r}{[2\alpha\Delta/(\Delta+r) - 1] + r}$$

冠层透射率与叶面积指数转换关系公式

Lathrop R G, Jr, Pierce L L：利用地面测量的冠层透射率及卫星遥感测量估计松树林冠层结构. Remote Sensing of Environment, 1991, 36

冠层透射率与叶面积指数 I_{la} 间的转换关系为：

$$I_{la} = -\ln(Q_i / Q_0) / K$$

式中，l_a是叶面积指数的投影值；K 是消光系数，冠层的透射率(Q_i/Q_0)通过将冠层下的光合作用有效辐射 PAR 的平均值(Q_i)除以总入射的光合作用有效辐射的平均值(Q_0)而得。

森林冠层反射模型

Nilson T, Peterson U：一个森林冠层反射模型及检验例子. Remote Sensing of Environment, 1991, 37

(1) 森林冠层的反射系数因子 R 可表示为 4 个成分的和：

$$R = R_{CR}^1 + R_{GR}^1 + R_{CR}^M + R_{GR}^M$$

式中，R_{CR}^1 是由树木冠层的单重散射导致的反射系数；R_{GR}^1 是地面植被及土壤的单重散射导致的反射系数；R_{CR}^M 是树冠层的多重散射导致的反射系数；R_{GR}^M 是地面植被的多重散射导致的反射系数。

$$R_{CR}^1 = \sum_{i=1}^{m} R_{CRi}^1$$

$$R_{CRi}^1 = N_i c_i \iiint_{V_1} u_i \Gamma_i(\Omega_0 \to \Omega) \times$$

$$p_{00i}(x,y,z;\Omega_0,\Omega)\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z/\cos\vartheta_0$$

式中，N_i 是单位地面面积上第 i 类树木的数量；$u_i = u_i(x,y,z)$ 是叶面积在冠层中的体积密度分布；$\Gamma_i(\Omega_0 \to \Omega)$ 是入射方向为 $\Omega_0 = (\vartheta_0, \Phi_0)$，散射方向为 $\Omega = (\vartheta, \Phi)$ 的冠层介质的散射相函数；ϑ_0 和 ϑ 是顶角；Φ_0 和 Φ 是方位角；p_{00i} 是在第 i 类树的冠层中从 (x,y,z) 点出发沿方向 Ω_0 和 Ω 的路径都通畅的概率，即双向间隙概率；参数 c_i 表示树的分布对泊松分布的偏差。

(2) 第二个成分的计算式为：

$$R_{GR}^1 = \rho_{GR}(\Omega_0,\Omega) p_{GR}(\Omega_0,\Omega)$$

式中，ρ_{GR} 是地面植被的反射因子；p_{GR} 是在 $z=0$ 时，即在地面植被高度上的双向间隙概率。

$$R_{CR}^M(\vartheta_0,\vartheta) = A_M(\vartheta_0) A_M(\vartheta)/c_1$$

式中，A_M 是树冠层的多重散射的漫反射率；c_i 是归一化常数。

(3) 地面植被的多重散射反射给为：

$$R_{GR}^M(\vartheta_0,\vartheta) =$$

$$F_{1M}(\vartheta_0) F_{1M}(\vartheta) \rho_{GR}(\vartheta_0,\vartheta) a(0,\vartheta) a(0,\vartheta_0)/c_2$$

式中，F_{1M} 是在地面高度上总的下行散射通量；c_2 是归一化常数。

物理"云"方程

Bouman B A M：根据地基 X-波段雷达后向散射数据估计农作物参数. Remote Sensing of Environment, 1991, 37

(1) Attema 和 Ulaby (1978)将植被对雷达波的后向散射模拟为各向同性的小水滴组成的云，模型的驱动参数是植被层中的水分量及表层土中的体积水分含量：

$$\gamma = C(\theta) \cdot [1 - \exp(-D W/\cos\theta)] +$$

$$G(\theta) \cdot \exp(m K - D W/\cos\theta)$$

式中，γ 是雷达波截面积($m^2 \cdot m^{-2}$)；W 是单位土壤表面上的农作物水量($kg \cdot m^{-2}$)；m 是表层土中体积水分含量(%)；θ 是入射角；D 是单位农作物水分的衰减系数；K 是单位体积水分含量表层上的水分系数；$C(\theta)$ 是具有光学厚度的植被覆盖的后向散射系数($m^2 \cdot m^{-2}$)；$G(\theta)$ 是干燥土壤的后向散射($m^2 \cdot m^{-2}$)。

(2) Bouman 和 Kasteren (1989)对原始的"云"模型进行了修正，即把方程中的 $W/\cos(\theta)$ 替换为农作物高度 h：

$$\gamma = C(\theta)[1 - \exp(-D h)] +$$

$$G(\theta)\exp(m K - D h)$$

这个模型对雷达后向散射的描述与两层"云"模型有相同的精度。

从光学测量值确定植被冠层参数的目标函数

Kuusk A：从光学测量值确定植被冠层参数. Remote Sensing of Environment, 1991, 37

如果已知一组冠层的半球方向的反射值 ρ_j^*，以及相应的几何及光照参数，根据模型 $\rho_j = \rho_j(X)$，对任意的光学及结构参数都可计算出当前的植被冠层反射系数，这里 X 是模型的参数矢量。目标函数可表示为：

$$F(X) = \sum_{j=1}^{m} \frac{\rho_j^* - \rho_j}{\rho_j^*} + \sum_{i=1}^{9} (x_i - x_{i,b})^2 w_i$$

式中，m 是测量值的个数；$x_{i,b}$ 是给定区域边界的相应的参数值；如果 $x_{i,\min} \leqslant x_i \leqslant x_{i,\max}$，则 $w_i = 0$，否则 $w_i = w$，w 是给定的常数；边界值 $x_{i,\min}$ 和 $x_{i,\max}$ 是预先给定的。

有限叶片聚集体中光子相互作用横截面的计算公式

Myneni R B, Asrar G：有限叶片的聚集体中光子相互作用横截面研究. Remote Sensing of Environment, 1991, 37

(1) 总的相互作用横截面 $\tilde{\sigma}$：

$$\tilde{\sigma}(r,\Omega)=u_L(r)G(r,\Omega;a_0)$$

式中，$u_L(r)$ 是叶面积密度函数；$G(r,\Omega;a_0)$ 是表示单位叶面积中非重叠面积的几何因子。

(2) 散射截面的微分：

$$\tilde{\sigma}_s(r:\Omega'\to\Omega)=u_L(r)(1/\pi)\Gamma(r;\Omega'\to\Omega;a_0)$$

式中，$\tilde{\sigma}_s(r;\Omega'\to\Omega)$ 表示散射截面的微分；$\Gamma(r:\Omega'\to\Omega;a_0)$ 是无大小点状叶片的面积散射相函数通过有限大小叶片的模拟值。

沙漠化系统动态仿真模型

胡孟春：奈曼旗土地沙漠化系统动态仿真研究. 地理学报，1991, 46(1)

(1) 状态方程：

$$POP\cdot K=POP\cdot J+POR\cdot JK\cdot DT$$

$$BRD_1\cdot K=BRD_1\cdot J+(RB_1\cdot JK-RB_2\cdot JK)DT$$

$$DES_1\cdot K=DES_1\cdot J+(DES_A\cdot JK-DE_1\cdot JK)DT$$

$$DES_2\cdot K=DES_2\cdot J+(DE_1\cdot JK-DE_2\cdot JK)DT$$

$$DES_3\cdot K=DES_3\cdot J+(DE_1\cdot JK-DES_2\cdot JK)DT$$

式中，POP 为人口；POR 为人口增长率；BRD_1 为牲畜存栏数；RB_1 为牲畜增长率；RB_2 为牲畜出栏率；DES_1 为原有潜在及正在发展的沙漠化面积；DES_A 为增长的沙漠化面积；DE_1 为强烈及严重沙漠化增长面积；DES_2 为强烈发展的沙漠化面积，DE_2 为严重沙漠化增长面积；DES_3 为严重沙漠化面积。

(2) 速率方程：

$$RB_1\cdot KL=CLIP[1.008\times RB_2\cdot JK,1.05\times RB_2\cdot JK,BRD_1\cdot K,BRED\cdot K]$$

$$RF_1\cdot KL=FOR_1\cdot K\times CLIP(PP,PPA\cdot K,LAN_7\cdot K,AFO\cdot K)+0.25\times RF_2\cdot JK$$

$$DES_B\cdot KL=(LAN_1-LAN_2\cdot K-LAN_6\cdot K-LAN_7\cdot K)\times 0.007(RF_2\cdot JK/RF_1\cdot JK)$$

$$DES_B\cdot KL=(LAN_1-LAN_2\cdot K-LAN_6\cdot K-LAN_7\cdot K)\times 0.007(RF_2\cdot JK/RF_1\cdot JK)$$

$$DES_B\cdot KL=0.17\times(RES_1\cdot JK+RES_2\cdot JK)\times DT$$

式中，$BRED$ 为载畜量；$CLIP$ 为逻辑函数；RF_1 为造林率；FOR_1 为幼林面积；LAN_7 为林地面积；AFO 为宜林地面积；RF_2 为林地减少面积；LAN_1 为总土地面积；LAN_2 为非生产用地；LAN_6 为牧业用地；RES_1 为幼林转移率；RES_2 为中龄林转移率。

(3) 辅助方程：

$$BRED\cdot K=\{[l_{18}\times 0.4\times(TIME\cdot K-1960)]\times LAN_6\cdot K+1.5\times GRAI\cdot K\}/l_{400}$$

$$VOU_5\cdot K=VOU_1\cdot K+VOU_2\cdot K+VOU_3\cdot K+VOU_4\cdot K$$

$$GRAI\cdot K=(0.1\times YY\cdot K+0.9)\times CRO_1\cdot K\times GMU\cdot K$$

$$LAN_5\cdot K=1.05\times CRO_3\cdot K$$

$$LAN_6\cdot K=LAN_4\cdot K-LAN_5\cdot K-LAN_7\cdot K-0.3*DES_3\cdot K$$

$$LAN_7\cdot K=FOR_1\cdot K+FOR_2\cdot K+FOR_3\cdot K$$

$$DES\cdot K=DES_1\cdot K+DES_2\cdot K+DES_3\cdot K$$

式中，l_{18} 为饲草亩产；l_{400} 为饲草标准；1.5× GRAI 为秸秆饲料；VOU_5 为农业总产值；VOU_1 为种植业产值；VOU_2 为牧业产值；VOU_3 为林业产值；VOU_4 为副业产值；$GRAI$ 为粮食总产；CRO_1 为种植业面积；GMU 为粮食单产；$YY\cdot K$ 为随机函数；LAN_5 为耕地面积；CRO_3 为总播种面积；LAN_4 为可利用土地面积；FOR_2 为中龄林面积；FOR_3 为成熟林面积。

资源最优空间配置的系统经济数学模型

周克俊：资源最优空间配置的系统经济理论研究. 地理学报，1991, 46(1)

(1) 地理空间的一般经济均衡条件：

$$P_{ijk}=|P_{ik}-P_{jk}|$$

$$P_{ijm}=|P_{im}-P_{jm}|$$

式中，$i=1,2,\cdots,N_1$；$j=1,2,\cdots,N_1$；$k=1,2,\cdots,N_2$；$m=1,2,\cdots,N_3$；P_{ik} 为经济活动中心 W_i 处第 k 类商品的价格；P_{im} 为 W_i 处第 m 类资源的价格；P_{ijk} 表示将第 k 类商品从 W_i 运到 W_j (或者相反)的运价；P_{ijm} 表示将第 m 类资源从 W_i 运到 W_j (或者相反)的运价；N_1 表示被研究区的经济活动中心 $W_i(i=1,2,\cdots,N_1)$ 数；N_2 表示全社会拥有的商品种类数；N_3 表示全社会拥有资源种类数。

(2) 消费子系统模型：

$$\begin{cases}\max\sum_{i=1}^{N_1}U_i(x_{i1},x_{i2},\cdots,x_{iN_2})\\ \mathrm{s\cdot t}\cdot\sum_{i=1}^{N_1}\sum_{k=1}^{N_2}(P_{ik}\ x_{ik})=C\\ P_{ik}\geqslant 0,x_{ik}\geqslant 0\\ (i=1,2,\cdots,N_1;k=1,2,\cdots,N_2)\end{cases}$$

式中，x_{ik} 表示 W_i 处公众消费第 k 种商品数量；P_{ik} 表示 W_i 处第 k 种商品的价格；U_i 表示 W_i 处的效用函数；C 为已知常量；N_1 和 N_2 含义同前。

(3) 生产子系统模型：

$$\begin{cases}\min\sum_{i=1}^{N_1}\sum_{m=1}^{N_3}\left[P_{im}\left(\sum_{k-1}^{N_2}y_{ikm}\right)\right]\\ \mathrm{s\cdot t}\cdot\sum_{i=1}^{N_1}f_{ik}(y_{ik1},y_{ik2},\cdots,y_{ikN_3})=\sum_{i=1}^{N_1}x_{ik}\\ \qquad(k=1,2,\cdots,N_2)\\ \sum_{i=1}^{N_1}\sum_{k=1}^{N_2}y_{ikm}\leqslant\sum_{i=1}^{N_1}R_{1im}(m=1,2,\cdots,N_3)\\ y_{ikm}\geqslant 0\quad P_{im}\geqslant 0\quad x_{ik}\geqslant 0\quad R_{1im}\geqslant 0\\ (i=1,2,\cdots,N_1;k=1,2,\cdots,N_2;m=1,2,\cdots,N_3)\end{cases}$$

式中，y_{ikm} 表示在 W_i 处为生产第 k 种商品所需要的第 m 种生产资源量；P_{im} 表示在 W_i 处第 m 种资源的价格；f_{ik} 表示在 W_i 处生产第 k 种商品的生产函数；R_{1im} 表示 W_i 处第 m 种可用于生产的资源原始限量；其他符号含义同前。

(4) 资源配置子系统模型：

$$\begin{cases}\max\sum_{i=1}^{N_1}\sum_{k=1}^{N_2}P_{ik}f_{ik}(\hat{y}_{ik1},\hat{y}_{ik2},\cdots,\hat{y}_{ikN_3})\\ \mathrm{s\cdot t}\cdot\sum_{i=1}^{N_1}\sum_{k=1}^{N_2}\hat{y}_{ikm}\leqslant\sum_{i=1}^{N_1}R_{1im}\\ \qquad(m=1,2,\cdots,N_3)\\ R_{1im}\geqslant 0\quad P_{ik}\geqslant 0\quad \hat{y}_{ikm}\geqslant 0\\ (i=1,2,\cdots,N_1;k=1,2,\cdots,N_2;m-1,2,\cdots,N_3)\end{cases}$$

式中，$\hat{y}_{ikm}$ 的含义与 y_{ikm} 相同；"∧"权表示此处的生产资源的分配是由资源配置子系统确定；其他符号含义同前。

(5) 交通运输子系统模型：

$$\begin{cases}\min\sum_{i=1}^{N_1}\sum_{j=1}^{N_1}\sum_{n=1}^{N_3}\left[\overline{P}_{ijn}\left(\sum_{k=1}^{N_2}y_{ijkn}+\sum_{m=1}^{N_3}y_{ijmn}\right)\right]\\ \mathrm{s\cdot t}\cdot\sum_{i=1}^{N_1}f_{ijk}(y_{ijk1},y_{ijk2},\cdots,y_{ijkN_3})=X_{jk}\\ (j=1,2,\cdots,N_1;k=1,2,\cdots,N_2)\\ \sum_{i=1}^{N_1}f_{ijm}(y_{ijm1},y_{ijm2},\cdots,y_{ijmN_3})\geqslant y_{jm}\\ (j=1,2,\cdots,N_1;m=1,2,\cdots,N_3)\\ \sum_{j=1}^{N_1}f_{ijm}(y_{ijm1},y_{ijm2},\cdots,y_{ijmN_3})\leqslant R_{1im}\\ (i=1,2,\cdots,N_1;m=1,2,\cdots,N_3)\\ \sum_{j=1}^{N_1}f_{ijk}(y_{ijk1},y_{ijk2},\cdots,y_{ijmN_3})=\\ f_{ik}(y_{ik1},y_{ik2},\cdots,y_{ikN_3})\\ (i=1,2,\cdots,N_1;k=1,2,\cdots,N_2)\\ \sum_{i=1}^{N_1}\sum_{j=1}^{N_1}\sum_{k=1}^{N_2}y_{ijkn}+\sum_{i=1}^{N_1}\sum_{j=1}^{N_1}\sum_{m=1}^{N_3}y_{ijmn}\leqslant\sum_{i=1}^{N_1}R_{0in}\\ (n=1,2,\cdots,N_3)\end{cases}$$

式中，$\overline{P}_{ijn}$ 表示 W_i 和 W_j 之间的平均第 n 类资源价格；y_{ijkn} 表示第 k 类商品从 W_i 运到 W_j 所需要的第 n 类资源量；y_{ijmn} 表示将第 m 类资源从 W_i 运到 W_j 所需的第 n 类资源量；f_{ijk} 表示 W_i 和 W_j 之间运送第 k 类商品的交通生产函数；f_{ijm} 表示 W_i 和 W_j 之间运送第 m 类资源的交通生产函数；R_{0in} 表示 W_i 处第 n 类可用于交通运输的资源原始限量。

(6) 协调公式：

$$P_{ik}^{(\beta+1)}=P_{ik}^{(\beta)}+\alpha_1\left[x_{ik}^{(\beta)}-\hat{x}_{ik}^{(\beta)}-\sum_{j=1}^{N_1}f_{ijk}^{(\beta)}+\sum_{j=1}^{N_1}\hat{f}_{ijk}^{(\beta)}\right]+\sum_{j=1}^{N_1}\alpha_{2j}\left[C_{jik}^{(\beta)}-(P_{ik}^{(\beta)}-P_{jk}^{(\beta)})\right]$$

$$P_{im}^{(\beta+1)} = P_{im}^{(\beta)} + \alpha_3[C - TC_1^{(\beta)} - TC_2^{(\beta)}] + \sum_{k=1}^{N_2}\alpha_{4k}(y_{ikm}^{(\beta)} - \hat{y}_{ikm}^{(\beta)}) + \sum_{j=1}^{N_1}\alpha_{5j}[C_{jim}^{(\beta)} - (P_{im}^{(\beta)} - P_{jm}^{(\beta)})]$$

式中，$m=1,2,\cdots,N_3$；$j=1,2,\cdots,N_1$；$k=1,2,\cdots,N_2$；$\alpha_1、\alpha_{2j}、\alpha_3、\alpha_{4k}$和$\alpha_{5j}$为(0,1)区间 shide 的常量(称为迭代步长)；β 表示递归迭代次数；其他符号意义同前。

森林资源动态计算公式

许定成，游先祥，韩熙春：应用 MSS 数字图像处理进行森林资源动态监测的探讨. 环境遥感，1991，6(2)

(1) 图像差值法计算公式：

$$\Delta X_{ijk} = X_{(2)ijk} - X_{(1)ijk} + C$$

式中，ΔX 表示变化图像；$X_{(1)}$ 为第一时相图像；$X_{(2)}$ 为第二时相图像；C 为常数；i 为行；j 为列；k 为波段。

(2) 比值植被指数差值法公式：

$$\Delta R_{ij} = \frac{MSS7_{(2)ij}}{MSS5_{(2)ij}}\cdot C_2 - \frac{MSS7_{(1)ij}}{MSS5_{(1)ij}}\cdot C_1 + C$$

式中，ΔR 为比值差值图像；$MSS_{(1)}$ 为第一时相；$MSS_{(2)}$ 为第二时相；$C、C_1$ 和 C_2 为常数；i 为行；j 为列。

(3) 归一化植被指数差值法公式：

$$\Delta ND_{ij} = ND_{(2)ij} - ND_{(1)ij} + C$$

$$ND_{ij}(K) = \frac{MSS7(K)_{ij} - MSS5(K)_{ij}}{MSS7(K)_{ij} + MSS(K)_{ij}}\cdot C\ K$$

式中，ΔND 为差值图像，ND 为归一化植被指数，K 为时相；C 为常数；i 为行；j 为列。

效益计算的基本公式

阎守邕：遥感技术的经济效益分析模型与计算方法. 环境遥感，1991，6(1)

$$B_{RS} = O_{RS} - I_{RS}$$

式中，$B_{RS}、O_{RS}$ 和 I_{RS} 分别为遥感技术的总效益、总产出和总投入。

人口、资源、环境协调发展的系统动力学模型

毛汉英：县域经济和社会同人口、资源、环境协调发展研究. 地理学报，1991，46(4)

(1) 系统动力学模型的回归模型群：

$$Y = C_0 + C_1K + C_2L + C_3E$$

式中，Y 为产出量；K 为资本投入量；L 为劳动力投入量；$C_0、C_1、C_2$ 及 C_3 是由回归分析计算(用 TSP 软件包)得到的回归系数；C_3E 表示模型中的残差修正项。

(2) SD 系统动力学模型仿真与方案选优的：

$$\ln U(x) = \sum_{i=1}^{K}\lambda_i \ln f_i(x) - \sum_{i=K+1}^{N}\lambda_i \ln f_i(x)$$

式中，$U(x)$ 为评价目标函数；λ_i 为各项指标的权重 $(i=1,2,\cdots,N)$。

冠层荧光模型

Olioso A, Méthy M, Lacaze B：利用冠层结构及叶片荧光的函数模拟冠层荧光. Remote Sensing of Environment, 1992, 41

(1) 在高度 L 处单个叶片的辐射激发荧光可表示为：

$$dF_1(L) - F_1(L)KI_0e^{-(k_e+k_f)L}dL$$

式中，$F_1(L)$ 是荧光效率；K 是截留系数；I_0 是在冠层顶部的激发辐射；k_e 是激发辐射的衰减系数；k_f 是荧光辐射的衰减系数。

(2) 考虑到发射荧光下行部分受背景(土地)在传感器方向反射部分为：

$$dF_2(L) = \rho F_1(L)KI_0e^{-(k_e-k_f)L-2k_{f}l_{la}}dL$$

式中，ρ 是背景反射率；l_{la} 是冠层的总的叶面积指数。

(3) 激发辐射的背景反射处理为：

$$dF_3(L) = \rho F_1(L)KI_0e^{-(k_f-k_e)L-2k_{e}l_{la}}dL$$

(4) 整个冠层发射的荧光为：

$$F_c = \int_0^{l_{la}}[dF_1(L) + dF_2(L) + dF_3(L)]$$

光合作用有效辐射的遥感模型

Asrar G, Myneni R B, Choudhury B J：植被冠层的空间非均匀性及吸收的光合作用有效辐射的遥感模型研究. Remote Sensing of Environment, 1992, 41

对水平结构非均匀的植被冠层，吸收的光合作用有效辐射的比例(F_{PAR})的公式为：

$$F_{PAR} = \frac{1}{F_{in}}\int_V dr[F_a^o(r) + F_a^d(r) + F_a^c(r)]$$

式中，V 是冠层的体积；F_a^o 和 F_a^d 分别是非碰撞辐射

场的太阳光和漫射光；F_a^c 是发生碰撞的辐射场；F_{in} 是入射辐射通量。

支持森林监测的一个新的森林-光相互作用模型

Rosema A, Verhoef W, Noorbergen H et al：支持森林监测的一个新的森林-光相互作用模型。Remote Sensing of Environment, 1992, 42

(1) 当观测顶角为 θ_0 时，冠层的地面覆盖观测值为：

$$c_0 = 1 - \exp(-kD \cdot \sec\theta_0)$$

式中，D 是树密度，即每公顷中树的数目；k 是表示平均树冠水平面积的常数。

(2) 荫蔽地面覆盖可定义为：

$$c_s = 1 - \exp(-kD\sec\theta_s)$$

式中，θ_s 是太阳天顶角。

(3) 对观测及阳光照射的透射率可给为：

$$T_0 = \exp(-\alpha\ l_{la}\ \sec\theta_0)$$

$$T_s = \exp(-\alpha\ l_{la}\ \sec\theta_s)$$

式中，T_0 和 T_s 分别是阳光及观测的单位树冠厚度的平均透射率，而不是整个树冠的；l_{la} 是叶面积指数；α 是消光系数；θ 是天顶角。

(4) 树冠对景物反射率的贡献可假定为与均匀树冠类似，即：

$$R = R_c(1 - T_s\ T_o) + R_g\ T_s\ T_o$$

式中，R_c 是在树冠厚度可视为无穷大时的树冠反射率；R_g 是地面反射率。

冬小麦旱情遥感监测模型

田国良，杨希华，郑柯：冬小麦旱情遥感监测模型研究。环境遥感，1992，7(2)

(1) 干旱指数模型：

$$D = \frac{W_t - W_w}{W_c}$$

式中，W_t 为时段末土体含水量；W_w 为作物凋萎时土壤水分；W_c 为作物需水(耗水)量。

(2) 表观热惯量模型：

$$P' = 2Q(1 - A)/\Delta T$$

式中，Q 为到达地面的太阳总辐射；A 为反照率；ΔT 为土壤昼夜温差变化。

(3) 纯入渗量 EW 模型：

$$EW(i,t) = WFC(i) - SW(i,t-1)$$

式中，$EW(i,t)$ 为第 t 日(旬)进入 i 层土壤的纯入渗量；$WFC(i)$ 为第 i 层土壤的田间持水量；$SW(i,t-1)$ 为第 t 日(旬)前 1 日(旬)第 i 层土壤的水储量。

(4) 实际蒸散量 ET 模型：

$$ET = R_n - G - H$$

式中，R_n 为净辐射；H 为从作物冠层到空气的显热通量；G 为冠层下面的土壤热通量。

(5) 冬小麦耗水量的确定：

$$W_c(t) = 340 \times \int_{t_1}^{t_2} R_c(t)\mathrm{d}t$$

式中，$W_c(t)$ 为某时段 $(t_2 - t_1)$ 的耗水量；t 为生长日数；$R_c(t)$ 为日耗水比(%)。

变权模型

李锥幸：变权模型。地理研究，1992，11(3)

$$\mu_0^{\wedge}(Y) = \sum \alpha_i \mu_i(X_i)$$

式中，α_i 为变权函数，一般以 $(x_1, x_2, \cdots, x_i, \cdots, x_m)$ 为其变量。

资源配置的灰色动态模型

李兰海，章熙谷：资源配置的灰色控制模型设计及应用。自然资源学报，1992，7(4)

$$\begin{cases} X_{(t)}^{(1)} = AX_{(t)}^{(1)} + BU_{(t)}^{(1)} \cdots\cdots\cdots\text{状态方程} \\ Y_{(t)}^{(1)} = CX_{(t)}^{(1)} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\text{目标函数} \\ X_{(t_0)}^{(0)} = X \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\text{出事条件} \\ U_{(t)}^{(0)} \in Q \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\text{约束条件} \end{cases}$$

式中，$X_{(t)}^{(1)}$ 为资源配置的状态向量；$U_{(t)}^{(1)}$ 为其输入向量；$Y_{(t)}^{(1)}$ 为其目标输出向量；A、B 和 C 为系数矩阵。

地质勘查中的数字图像处理技术及矿产预测模型

杨文久，刘心季：地质勘查中的数字图像处理技术．环境遥感，1992，7(4)

(1) 人工阴影处理——曲面上各个面元(向元) $\cos\lambda$ 的值：

$$\cos\lambda = \frac{-p\cos\theta\cos\Phi - q\sin\theta\cos\Phi + \sin\Phi}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}}$$

式中，p、q 分别为曲面 X 方向和 Y 方向梯度。

(2) 综合信息矿产预测模型：

$$V=\sum_{i=1}^{n}W_i V_i$$

式中，V 为产生多金属矿综合有利度变量；W_i 为变量 V_i 的权。

冠层反射率的二阶导数

Li Y, Shah T H D, Kanemasu E T et al：利用冠层反射率的二阶导数监测在不同土壤背景下的牧场植被。Remote Sensing of Environment, 1993, 44

(1) 冠层反射率的二阶导数与叶面积指数的关系：

$$l_{la}=\frac{1}{k}\{\ln[\rho_c''(\lambda)]-\ln[\rho_c''(\lambda)-\rho''(\lambda)]\}$$

式中，$\rho''(\lambda)$ 是冠层/背景系统的光谱反射率的二阶导数；$\rho_c''(\lambda)$ 是表示冠层的贡献；k 是叶片法向分布函数。

(2) 在波长 λ 处 ρ'' 的值可近似计算为：

$$\rho''(\lambda_i)=\frac{2\left[\frac{\rho(\lambda_{i+1})-\rho(\lambda_i)}{\lambda_{i+1}-\lambda_i}-\frac{\rho(\lambda_i)-\rho(\lambda_{i-1})}{\lambda_i-\lambda_{i-1}}\right]}{\lambda_{i+1}-\lambda_{i-1}}$$

生物量产出模型

Rosema A：在 Sahel 地区利用 METEOSAT 进行蒸散量及生物量的监测。Remote Sensing of Environment, 1993, 46

(1) 农作物大气中吸收 $CO_2(U)$的可表示为：

$$U=\Delta CO_2(r_a+1.8r_d+r_m)$$

式中，r_a 是大气阻尼；r_d 是由于干燥的顶层而附加的阻尼；r_m 是 CO_2 在气孔与光合作用位置间扩散时的叶肉阻尼。

(2) 相对生物量产出度(v)表示为：

$$v=(r_a+r_m)/(r_a+r_m+1.8r_d)$$

(3) 可能产出(P)正比于目前生物量(B)：

$$P=0.1vB\quad(B<B_1)$$

式中，B_1 表示农作物可能达到的最大生物量。

MSWRSIS 系统的评价指数

王毅，徐云川，彭万寿等：固体废弃物遥感微机信息系统的建立及其应用研究。环境遥感，1993, 8(1)

$$P_i=\left\{\left(\sum_{j=1}^{n}A\cdot M\right)_1\times\left(\sum_{j=1}^{n}A\cdot M\right)_2\times\cdots\times\left(\sum_{j=1}^{n}A\cdot M\right)_i\times\cdots\times\left(\sum_{j=1}^{n}A\cdot M\right)_n\right\}\Bigg/\left\{\left(\sum_{j=1}^{n}A\cdot M\right)_{\max 1}\times\left(\sum_{j=1}^{n}A\cdot M\right)_{\max 2}\times\cdots\times\left(\sum_{j=1}^{n}A\cdot M\right)_{\max n}\right\}$$

式中，A 为分配分数；M 为权重数；$\sum_{j=1}^{n}A\cdot M$ 为各项目的内部分数和；$\left(\sum_{j=1}^{n}A\cdot M\right)_{\max}$ 为各项目内部最大分数和。

居民生活条件的综合评价指标

齐清文，严玲：应用彩色红外航空像片进行城市居民生活条件调查和分析。环境遥感，1993, 8(1)

$$P_i=\frac{1}{4}\sum_{k=1}^{4}P_k\quad(i=1,2;\ k=1,2,3,4)$$

式中，P_k 为单因子评分(方便度、舒适度各有四项因子)。

地下水资源系统多目标管理模型及模糊带权方法

谢新民：济南地下水资源系统多目标管理模型及模糊带权方法。自然资源学报，1993, 8(1)

1. 多目标管理模型

(1) 系统的状态方程：

岩溶裂隙含水系统：

$$\mu_c\cdot\frac{\partial h_c}{\partial t}=\mathrm{div}(T_c\mathrm{grad}\,h_c)+\varepsilon_c(x,\ y,\ t)-\sum_{j=1}^{m_c}Q_c(x_j,\ y_j,\ t)\delta(x-x_j,\ y-y_j)-\frac{k'}{m'}(h_s-h_c)$$

$$t>0;\quad (x,y)\in G \tag{1}$$

$$h_c(x,y,t)_{t=0}=h_{c0}(x,y)\ (x,y)\in \overline{G}_c \tag{2}$$

$$h_c(x,y,t)_{T_{c1}}=h_{c1}(x,y,t)$$

$$t>0;\quad (x,y)\in T_{c1} \tag{3}$$

$$(T_c \mathrm{grad} h_c\cdot n)_{T_{c2}}=q_c(x,y,t)$$

$$t>0;\quad (x,y)\in T_{c2} \tag{4}$$

松散孔隙含水系统：

$$\mu_s\cdot\frac{\partial h_s}{\partial t}=\mathrm{div}(T_s\mathrm{grad}h_s)+\varepsilon_s(x,y,t)-\sum_{j=1}^{m_s}Q_s(x_j,y_j,t)\delta(x-x_j,y-y_j)-\frac{k'}{m'}(h_s-h_c)$$

$$t>0;\quad (x,y)\in G_s \tag{5}$$

$$h_s(x,y,t)_{t=0}=h_{s0}(x,y)\quad (x,y)\in \overline{G}_s \tag{6}$$

$$h_s(x,y,t)_{T_{s1}}=h_{s1}(x,y,t)$$

$$t>0;\quad (x,y)\in T_{s1} \tag{7}$$

$$(T_s\mathrm{grad}h_s\cdot \vec{n})_{T_{s2}}=q_s(x,y,t)$$

$$t>0;\quad (x,y)\in T_{s2} \tag{8}$$

为了利用响应矩阵法建立管理模型，首先将模拟模型式(1)~(4)和式(5)~(8)进行分解，分别求出“系统”的响应函数$\beta(k,j,n-i+1)$和系统的附加水位降深值$S_0(k,n)$；然后，根据线性迭加原理，写出系统的状态方程：

$$S(k,n)=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j\in\overline{M}}Q(j,i)\beta(k,j,n-i+1)+S_0(k,n) \tag{9}$$

或：

$$h(k,n)=h_0(k)-\sum_{i=1}^{N}\sum_{j\in\overline{M}}Q(j,i)\beta(k,j,n-i-1)-S_0(k,n)$$

$$(k\in M;\ n=1,\cdots,N)$$

式中，$h_0(k)$为第k结点处的初始水位；M为计算结点集；$\overline{M}$为抽水井(组)点集；N为总计算时段数。

由于抽水井(组)均分布在三角形剖分单元的内部，为非结点井(组)，本文利用面积坐标的概念，来确定三角形剖分单元Δ_β内任一抽水井(组)l的水位值或水位降深值：

$$h(l,n)=\phi_i(x,y)h(i,n)+\phi_j(x,y)h(j,n)+\phi_k(x,y)h(k,n) \tag{10}$$

或

$$s(l,n)=h_0(l)-\phi_i(x,y)h(i,n)-\phi_j(x,y)h(j,n)-\phi_k(x,y)h(k,n)$$

$$(l\in\overline{M};\ n=1,\cdots,N)$$

式中，(x,y)为Δ_β内第井(组)l井(组)点的位置坐标；$\phi_i(x,y)$，$\phi_j(x,y)$和$\phi_k(x,y)$分别表示Δ_β内第井(组)l井(组)点到顶点i，j，k的面积坐标；i，j和k为Δ_β的三个顶点。

(2) 目标函数：

$$\min z_1=\sum_{n=1}^{N}\sum_{k\in\overline{M}}\left[(1+r)^{-n}P(k)Q(k,n)H(k)+\sum_{i=1}^{N}\sum_{j\in\overline{M}}\beta(k,j,n-i+1)Q(j,i)+S_0(k,n)\right] \tag{11}$$

$$\max z_2=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j\in\overline{M}}Q(j,i) \tag{12}$$

$$\max z_3=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j\in M_1}h(j,i) \tag{13}$$

式中，r为贴现率；$P(k)$为第k抽水井(组)每抽单位体积单位扬程水量的抽水费用；$H(k)$为第k抽水井(组)的初始扬程；M_1为控制结点集。

(3) 约束条件：

为了实现保泉供水的宗旨，在满足系统的状态方程以外，还应满足如下限制：为了尽快使名泉出流，将泉群区域的地下水位控制在泉水出流时最低水平以上，对应(14)式；为了防止水质污染、地下水位降落漏斗过大，将东郊和西郊水源地的地下水位控制在某一适当的范围内，对应(15)式；为了满足社会对地下水资源系统的最低需水量要求，系统的总抽水量不得小于最低需水量，对应(16)式；每个井(组)的抽水量不能超过其最大抽水能力，同时不得低于最小允许抽水量，对应(17)式。

$$h(k,n)>h_{\min}(k,n)$$

$$(k\in M_2;\quad n=1,\cdots,N) \tag{14}$$

$$h_{\min}(k)\leqslant h(k,\ n)\leqslant h_{\max}(k)$$

$$(k\in M_3;\quad n=1,\cdots,\ N) \tag{15}$$

$$\sum_{j\in\overline{M}}Q(j,\ n)\geqslant Q_{\min}(n)$$

$$(n=1,\cdots,\ N) \tag{16}$$

$$Q_{\min}(j)\leqslant Q(j,\ i)\leqslant Q_{\max}(j)$$

$$(j\in\overline{M};\quad i=1,\cdots,\ N) \tag{17}$$

式中，$h_{\min}(k,\ n)$为泉群区域第k控制结点在第n时段末的最小允许水位；$h_{\min}(k)$、$h_{\max}(k)$分别为东郊、西郊水源地第k控制结点的最小、最大允许水位；$Q_{\min}(n)$为第n时段内的最低需水量；$Q_{\min}(n)$、$Q_{\max}(n)$分别为第j抽水井(组)的最小、最大允许抽水量；M_2为泉群区域控制结点集；M_3为东郊、西郊水源地控制结点集。

2. 模糊带权方法

(1) 目标含属于模糊子集隶属函数：

设地下水资源系统多目标管理问题有n个目标，建立n个模糊子集：θ_1，θ_2，…，θ_n；其相应的隶属函数为：μ_1，μ_2，…，μ_n；相应的权重为：ω_1，ω_2，…，ω_n，则目标函数为：

$$\max\left\{\sum_{i=1}^{n}\omega_i\mu_i\right\} \tag{18}$$

确定模糊子集隶属函数的常见方法有模型法、专家评分法和统计法等。采用L．A．扎德(1972)提出的最大、最小隶属函数模型法，来求解模糊子集的隶属函数：

$$\mu(x)=\begin{cases}1 & (f(x)\geqslant\sup(f))\\ \left[\dfrac{f(x)-\inf(f)}{\sup(f)-\inf(f)}\right]^2 & (\inf(f)<f(x)<\sup(f))\\ 0 & (f(x)\leqslant\inf(f))\end{cases} \tag{19}$$

或

$$\mu(x)=\begin{cases}1 & (f(x)<\inf(f))\\ \left[\dfrac{\sup(f)-f(x)}{\sup(f)-\inf(f)}\right]^n & (\inf(f)<f(x)<\sup(f))\\ 0 & (f(x)\geqslant\sup(f))\end{cases} \tag{20}$$

式中，$\sup(f)$、$\inf(f)$分别表示$f(x)$的上下确界，其值根据实际情况分析确定；n为指数，根据不同的隶属函数形式，取不同的n值。利用这种模糊带权方法就很容易的将多目标管理问题化为单目标管理问题。

(2) 模糊带权非线性规划数学模型：

根据已拟定的三个管理目标，建立三个目标模糊子集：总抽水费用最小模糊子集、总抽水量最大模糊子集、控制结点地下水位之和最大模糊子集。显然，总抽水费用越小，则经济效益就越大，相应的隶属度就越高；则总抽水量和控制结点地下水位之和越大，则社会效益和环境效益越好，相应的隶属度就高。根据基础资料和单目标经济管理模型式(11)、(9)、(14)~(17)，以及单目标水力管理模型式(12)、(9)、(14)~(17)与式(13)、(9)、(14)~(17)，分别求出目标函数的上下确界。

① 总抽水费用模糊子集隶属函数：

$$\mu_1(z_1)=\begin{cases}1 & (z_1\leqslant 418.47);\\ \left\{1247.06-\sum\sum\left[(1+r)^{-n}P(k)Q(k,n)H(k)+S_0(k,\ n)+\sum\sum\beta(k,\ j,\ n-i+1)Q(j,\ i)\right]\right\}/(1247.06-418.47) & (418.47<z_1<1247.06);\\ 0 & (z_1\geqslant 1247.06)\end{cases} \tag{21}$$

② 总抽水量模糊子集隶属函数：

$$\mu_2(z_2)=\begin{cases}1 & (z_2\geqslant 272.00);\\ \dfrac{\left(\sum\limits_{i=1}^{N}\sum\limits_{j\in\overline{M}}Q(j,\ i)-128.00\right)}{(272.00-128.00)} & (128.00<z_2<272.00);\\ 0 & (z_2\leqslant 128.00)\end{cases} \tag{22}$$

③ 控制结点地下水位之和模糊子集隶属函数：

$$\mu_3(z_3)=\begin{cases}1 & (z_3\geqslant 1515.165);\\ \dfrac{\sum\limits_{i=1}^{N}\sum\limits_{j\in\overline{M}}h(j,\ i)-1502.136}{1515.165-1502.136} & (1502.136<z_1<1515.165);\\ 0 & (z_1\leqslant 1502.136)\end{cases} \tag{23}$$

利用式(21)~(23)和权重就可确定济南地下水资源系统的模糊带权非线性规划数学模型的目标函数式

(18)，而由目标函数式(18)和约束条件(9),(14)~(17)就构成了模糊带权非线性规划数学模型 FWNLP。

融雪期雪面的能量平衡方程

马虹，刘一峰，胡汝骥：天山季节性积雪的能量平衡研究和融雪速率模拟. 地理研究，1993，12(1)

$$Q_m = Q^* + Q_h + Q_e + Q_p + Q_g$$

式中，Q_m 为用于融雪所消耗的能量；Q^* 为净辐射；Q_h，Q_e 分别为雪面-大气间显热和潜热交换；Q_p 为降雨供热；Q_g 为地中热流项；且其中：

$$Q_h = \rho_a C_a D U_z(\theta_z - \theta_s)$$

$$Q_e = \rho_a L(\varepsilon / \rho) D U_z(e_z - e_s)$$

式中，θ_z，θ_s 分别为在雪面和高度 z 处的温度；e_z，e_s 分别为雪面和高度 z 处的水汽热；ρ_a 为空气密度；C_a 为空气定压比热；L 为汽化潜热；ε 为水和空气的分子重比；P 为大气压强；U_z 为雪面以上 z 高度处的风速；D 为中性层结情况下的块体交换系数，$D = K^2/[lu(z/z_0)]^2$，K 为卡尔曼常数，z_0 为雪面粗糙度系数。

对于稳定层结 $(R_i > 0)$

$$D_s = D/(1 + \sigma R_i)$$

对于不稳定层结 $(R_i < 0)$

$$D_u = D(1 - \sigma R_i)$$

式中，$R_i = g_z(\theta_z - \theta_s)/\theta_z(U_z - U_s)^2$；$g$ 为重力加速度；$\sigma = 10$ 为常数。

灌溉水库优化调度的 AD 模型

蔡锦山，陈传友：灌溉水库优化调度的 AD 模型. 自然资源学报，1993，8(2)

1. 最优分解条件探讨

设想有一个 N 库并联系统，可以假定每个水库的有效函数是各自独立的，如果水库的效益函数用 $B^{(i)}(i = 1, \cdots, N)$ 来表示，那么分解后水库最优状态可由下面的优化模型来确定：

目标函数：

$$\max\left\{\sum_{i=1}^{N} B^{(i)}\right\} \tag{1}$$

受约束于：

(a) 水库总有效蓄水量约束：

$$\sum_{i=1}^{N} V_{t+1}^{(i)} = \overline{V}_{t+1} \quad (\forall i, t) \tag{2}$$

式中，$\overline{V}_{t+1}$ 为 $t+1$ 时段初聚合水库的有效需水量。

(b) 最大有效蓄水量约束：

$$V_{t+1}^{(i)} \leqslant V_{\max}^{(i)} \quad (\forall i, t) \tag{3}$$

(c) 最小有效蓄水量约束：

$$V_{t+1}^{(i)} \leqslant V_{\min}^{(i)} \quad (\forall i, t) \tag{4}$$

(d) 最大和最小放水量约束：

$$Q_{\min}^{(i)} \leqslant Q_t^{(i)} \leqslant Q_{\max}^{(i)} \quad (\forall i, t) \tag{5}$$

(e) 水库水量平衡约束：

$$V_{t+1}^{(i)} = V_t^{(i)} + I_t^{(i)} - Q_t^{(i)} - E_t^{(i)} - X_t^{(i)} \tag{6}$$

上列式中，V 为水库的有效蓄水量的变量；I 为由历史资料分析而得的水库入流；Q 为水库的放水量的变量；X 为水库的弃水量的变量；E 为水库的水量损失，包括蒸发和渗漏损失两项变量；下标中 t 表示 t 时段的相应值；顶上有"—"表示聚合水库的相应值；上标中 i 表示第 i 水库；下标中 min，max 分别表示相应量的最小、最大值。

对于供水为主的水库，水库提供水量的多少直接影响到水库灌区的效益，因而可以假定水库的效益为放水量的函数。把上面(6)式改写如下：

$$V_{t+1}^{(i)} = W_t^{(i)} - Q_t^{(i)} - X_t^{(i)} \quad (\forall i, t) \tag{7}$$

此处，$W_t^{(i)} = V_t^{(i)} + I_t^{(i)} - E_t^{(i)}$ 为已知，把(7)式代入上面的优化模型中，则各库分解后的最优状态就可以由如下问题所确定的解获得：

目标函数：

$$\max\left\{\sum_{i=1}^{N} B^{(i)}\right\}$$

受约束于：

(a) 总有效蓄水量约束：

$$\sum_{i=1}^{N} W_t^{(i)} - Q_t^{(i)} - X_t^{(i)} - V_{t+1}^{(i)} = 0 \quad (\forall i, t) \tag{8}$$

(b) 最大有效蓄水量约束：

$$W_t^{(i)} - Q_t^{(i)} - X_t^{(i)} - V_{\max}^{(i)} \leqslant 0 \quad (\forall i, t) \tag{9}$$

(c) 最小有效蓄水量约束：

$$-\left(W_t^{(i)}-Q_t^{(i)}-X_t^{(i)}\right)+V_{\min}^{(i)}\leqslant 0 \quad (\forall i,\ t) \tag{10}$$

(d)　最大放水量约束：

$$Q_t^{(i)}-Q_{\max}^{(i)}\leqslant 0 \quad (\forall i,\ t) \tag{11}$$

(e)　最小放水量约束：

$$-Q_t^{(i)}+Q_{\min}^{(i)}\leqslant 0 \quad (\forall i,\ t) \tag{12}$$

上面这个优化模型实际是一个极大化问题，可用拉氏乘子θ、$\lambda^{(i)}$、$\alpha^{(i)}$、$\beta^{(i)}$、$\Phi^{(i)}$和$(\forall)$作为罚因子，写成拉氏函数如下：

$$L\left[Q_i^{(i)},\ X_i^{(i)},\ \theta_i^{(i)},\ \lambda_i^{(i)},\ \alpha_i^{(i)},\ \beta_i^{(i)},\ \Phi_i^{(i)}\right]=$$

$$-\sum_{i=1}^{N}B_i^{(i)}+\theta\left\{\sum\left[W_i^{(i)}-Q_i^{(i)}+X_i^{(i)}\right]-\overline{V}\right\}+$$

$$\sum_{i=1}^{N}\lambda_i^{(i)}\left[W_i^{(i)}+Q_i^{(i)}+X_i^{(i)}+V_{\max}^{(i)}\right]+$$

$$\sum_{i=1}^{N}\alpha_i^{(i)}\left[-W_i^{(i)}+Q_i^{(i)}+X_i^{(i)}+V_{\min}^{(i)}\right]+$$

$$\sum_{i=1}^{N}\beta_i^{(i)}\left[Q_i^{(i)}+Q_{\max}^{(i)}\right]+\sum_{i=1}^{N}\Phi_i^{(i)}\left[-Q_i^{(i)}+Q_{\max}^{(i)}\right] \tag{13}$$

如果每一个水库的效益函数为凸函数，则(13)式的最优条件之一为：

$$\frac{\delta B^{(i)}}{\delta Q^{(i)}}-\theta-\lambda^{(i)}+\alpha^{(i)}+\beta^{(i)}-\Phi^{(i)}<0$$

$$(\forall i\text{ 若 }Q_t^{(i)}=0) \tag{14a}$$

或者为：

$$-\frac{\delta B^{(i)}}{\delta Q^{(i)}}-\theta-\lambda^{(i)}+\alpha^{(i)}+\beta^{(i)}-\Phi^{(i)}=0$$

$$(\forall i\text{ 若 }Q_t^{(i)}>0) \tag{14b}$$

在一个确定最优状态的实际分配中，对于水库蓄水和放水量在任何时候均满足其约束时，其他拉氏乘子无效，(14)就变成(13)式的极大化条件，这时，上(14b)式变为：

$$\frac{\delta B^{(i)}}{\delta Q^{(i)}}-\theta=0$$

即：

$$\frac{\delta B^{(i)}}{\delta Q^{(i)}}=\theta \quad (\forall t) \tag{15}$$

2. 灌溉水库群 AD 模型的建立

(1) 水库的聚合：

聚合水库由下列式子定义出：

聚合水库入流：

$$\overline{I}_t=\sum_{i=1}^{N}I_t^{(i)}$$

聚合水库放水：

$$\overline{Q}_t=\sum_{i=1}^{N}Q_t^{(i)}$$

聚合水库溢流：

$$\overline{X}_t=\sum_{i=1}^{N}X_t^{(i)}$$

聚合水库损失水量：

$$\overline{E}_t=\sum_{i=1}^{N}E_t^{(i)}$$

聚合水库的最大有效蓄水和放水量由下列式子定义：

最大有效蓄水量：

$$\overline{V}_{\max}=\sum_{i=1}^{N}V_{\max}^{(i)}$$

最小有效蓄水量：

$$\overline{V}_{\min}=\sum_{i=1}^{N}V_{\min}^{(i)}$$

最大放水量：

$$\overline{Q}_{\max}=\sum_{i=1}^{N}Q_{\max}^{(i)}$$

最小放水量：

$$\overline{Q}_{\min}=\sum_{i=1}^{N}Q_{\min}^{(i)}$$

(2) 聚合水库优化运行：

目标函数：

$$\min\left\{\sum_{i=1}^{N}\left(D_t-\overline{Q}_t\right)^2\right\}$$

式中，$\overline{Q}_t$为t时段内聚合水库的供水量；D_t为t时段内灌区需水量。

约束条件：

(a)　水库蓄水量约束：

$$\overline{V}_{\min}\leqslant\overline{V}_t\leqslant\overline{V}_{\max} \quad (\forall t)$$

(b)　水库放水量约束：

$$\overline{Q}_{\min}\leqslant\overline{Q}_t\leqslant\overline{Q}_{\max} \quad (\forall t)$$

(c)　聚合水库的水量平衡约束：

$$B_t=\overline{V}_t+\overline{I}_t-\overline{Q}_t-\overline{E}_t-\overline{X}_t \quad (\forall t)$$

式中：B_t 为 t 时段末聚合水库的蓄水量，对于 B_t 有：

$B_t = \overline{V}_{t-1}$，若 $\overline{V}_{\min} \leqslant B_t \leqslant \overline{V}_{\max}$；

$B_t = \overline{V}_{\max}$，若 $B_t > \overline{V}_{\max}$；

$B_t = \overline{V}_{\min}$，若 $B_t \leqslant \overline{V}_{\min}$；

$X_t = B_t - \overline{V}_{\max}$，若 $B_t > \overline{V}_{\max}$；

$X_t = 0$，其他情况下。

上述优化模型可用动态规划技术求解。注意到聚合水库的水量损失 $\overline{E}_t$ 是定义为各水库水量损失之和，而各水库水量损失一般由该时段内平均蓄水量的线性函数来计算，即：$E_t^{(i)} = \frac{1}{2} L_t^{(i)} \left[V_t^{(i)} + V_{t-1}^{(i)} \right]$。

(3) 聚合水库优化结果分解：

分解模型的目标函数：

$$BI = \max(BW - C)$$

式中，BI 为水利措施而使灌区作物增加的效益；$BW = \sum_k \alpha_k W_k A_k \rho_k$，$W_k$ 为供给 k 作物的水量(m^3)，A_k 为 k 作物的灌溉面积(万亩)，α_k 为单位灌溉面积单位供水量所增加的作物产量($kg \cdot m^{-3} \cdot$ 亩$^{-1}$)，ρ_k 为 k 作物的单价(元 $\cdot kg^{-1}$)；C 为水库系统供水运行时的年总费用，为各水库年总费用之和，$C = \sum_i C_i$，C_i 包括水库年运行费(折旧费和维修管理费)，输水渠道及其上面建筑物的年费用、田间工程的年费用。

约束条件：

(a) 水库的水量平衡约束：

$$V_{t+1}^{(i)} = V_t^{(i)} + I_t^{(i)} - Q_t^{(i)} - X_t^{(i)} - E_t^{(i)}$$

(b) 水库有效蓄水量约束：

$$V_{\min}^{(i)} \leqslant V_t^{(i)} \leqslant V_{\max}^{(i)} \quad (\forall i,\ t)$$

(c) 水库放水量约束：

$$Q_{\min}^{(i)} \leqslant Q_t^{(i)} \leqslant Q_{\max}^{(i)} \quad (\forall i,\ t)$$

(d) 水库总有效蓄水量约束：

$$\sum_{i=1}^{N} V_t^{(i)} = \overline{V}_t \quad (\forall i,\ t)$$

(e) 供水量等式：

$$\sum_k W_k = e \sum_i \sum_t Q_t^{(i)}$$

式中，e 为灌溉水的利用系数。

如此就建立了多库并联系统的分解模型，求解此模型即可得出并联各库的最优运行策略。由于 $\alpha_k = f(W_k)$ 而使目标函数成为非线性函数，α_k 为 k 作物单位面积单位灌溉水量的灌溉效益，即为灌溉水量的边际效益，利用线性近似和逐步逼近方法可以把目标函数化为线性函数以方便求解。方法是：(a)由实际资料拟和出灌溉响应曲线。(b)由直线近似地代表出此灌溉响应曲线得到初始的 α_{k0}，这时 α_{k0} 为常数。(c)用单纯线性法求解上面模型，得一灌溉供水量 W_{k0}。(d)在 W_{k0} 处取 $W_{k0} \pm \Delta W$ 两点，而在该区域内用直线代替拟和曲线，重复以上计算即可得出更趋于曲线的 α_k 值来。(e)前后两次计算值为 α_{k1}，α_{k2}，若 $|\alpha_{k1} - \alpha_{k2}| \leqslant \varepsilon$（$\varepsilon$ 为规定的某一精确度），则停止计算，结果得到。

如果水库之间为串联形势，则模型具有以下不同点：

(1) 聚合水库的定义不同：

聚合水库的入流为：

$$\bar{I}_t = \sum_{i=1} \left[I_t^{(i)} + X_t^{(i-1)} \right]$$

聚合水库的弃水为：

$$\overline{X}_t = X_t^{(N)}$$

(2) 聚合水库最优运行值的分解模型中水量平衡约束不同：

$$V_{t-1}^{(i)} + Q_t^{(i)} + X_t^{(i)} = V_t^{(i)} + I_t^{(i)} + X_t^{(i-1)} - E_t^{(i)}$$

阶乘模型的基本方程

李付琴，田国良：小麦单产的遥感-气象综合模式研究. 环境遥感，1993，8(3)

$$\hat{y}_t = (\hat{y}_{t-1}) \prod_{i=1}^{p} x_i$$

式中，$\hat{y}_t$ 为作物某一发育阶段的产量；$\hat{y}_{t-1}$ 为前一发育阶段预测的产量；x_i 为预测因子。

自然资源综合优势度

李泽辉：在计算机上实现国土资源综合评价指标体系的研究. 自然资源学报，1993，8(3)

$$P_i = \frac{mn - \sum_{i=1}^{m} d_{ij}}{mn - n}$$

式中，P_i 为 i 地区的自然资源综合优势度；m 为被统计的自然资源种数；n 为对比地区个数；$\sum_{i=1}^{m} d_{ij}$ 为 i 地区各种自然资源占全省(或大区域)名次之和

水资源承载能力综合评价模型

许有鹏：干旱区水资源承载能力综合评价研究——以新疆和田河流域为例. 自然资源学报 1993，8(3)

设给定两个有限论域：

$$u=\{u_1, u_2, \cdots, u_m\}$$

$$V=\{V_1, V_2, \cdots, V_n\}$$

式中，u 代表综合评判的因素所组成的集合；V 代表评语所组成的集合；则模糊综合评判即表示为下列模糊变换 $B=A\times R$，A 为 u 上的模糊子集，而评判结果 B 则是 V 上的模糊子集。并且可表示为：

$$A=\{a_1, a_2,\cdots, a_m\} \quad 0\leqslant a_i\leqslant 1$$

$$B=\{b_1, b_2,\cdots, b_n\} \quad 0\leqslant b_j\leqslant 1$$

式中，a_i 即为 u_i 对 A 的隶属度，它表示单因素 u_i 在总评定因素中所起作用大小的变量，也在一定程度上代表根据单因素 u_i 评定等级的能力，而 b_j 则为等级 V_j 对综合评定所得模糊子集 B 的隶属度，它们表示综合评判的结果。

而评判矩阵：

$$R=\begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{vmatrix}$$

式中，r_{ij} 表示因素 u_i 的评价对等级 V_j 的隶属度，因而矩阵 R 中第 i 行表达为 $R_i=\{r_{i1}, r_{i2},\cdots, r_{in}\}$，即为对第 i 个因素 u_i 的单因素评判结果。

基于反射率的农作物效率计算公式

Bausch W C：土壤背景效应对玉米基于反射率的农作物效率的反应．Remote Sensing of Environment, 1994, 46

玉米基于反射率的农作物效率 K_{cr} 表示为：

$$K_{cr}=1.416\,\text{SAVI}+0.017$$

式中，SAVI 是土壤校正植被指数。

森林反射率随年龄变化轨迹的非线性回归曲线

Nilson T, Peterson U：森林反射率对年龄的依赖关系——主要驱动因子的分析．Remote Sensing of Environment, 1994, 48

$$y=a+b\exp(-cx)$$

式中，y 是反射率因子；x 是以年为单位的群丛年龄，a、b 和 c 是参数。

利用卫星遥感在空间维和时间维上的外推模型

Kustas W P, Perry E M, Doraiswamy P C et al：利用卫星遥感在时间维和空间维上外推一个半干旱牧场盆地的蒸散量估计值．Remote Sensing of Environment, 1994, 49

(1) 空间外推方法：

对净辐射(R_n)：

$$R_n-R_{nr}=(a_{sr}-a_s)R_{sr}+\sigma\varepsilon_{sr}(T_{sr}^4-T_r^4)$$

式中，下标 r 表示参考地点的局部气象值；a_s 是表面漫反射系数；T_s 是表面温度；ε_r 是表面发射率；σ 是 Stefan-Boltzmann 常数($5.67\times 10^{-8}\,\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$)。

对土壤热通量(G)：

$$G-G_r=[c(1-a_s)-c_r(1-a_{sr})]R_{sr}-\sigma\varepsilon_{sr}(cT_{sr}^4-c_rT_{sr}^4)+\sigma\varepsilon_{ar}T_{ar}^4(c-c_r)$$

式中，ε_a 是大气的发射率；T_a 是屏幕高度的大气温度；c 表示 $-G/R_n$ 的值。

对显热通量(H)：

$$H-H_r=\rho c_p(T_{sr}-T_s)/r_{ahr}$$

式中，ρc_p 是大气的体积热容量；r_{ahr} 是参考地点冠层表面与大气界面间热传输的阻力。

阻力可用下式估计：

$$r_{ah}=\{\ln[(z_u-d_0)/z_{0m}]-\Psi_m\}\times\{\ln[(z_T-d_0)/z_{0h}]-\Psi_h\}/k^2u$$

式中，k 是 von Karman 常数(≈ 0.4)；Ψ_m 和 Ψ_h 是表层动量和热的稳定性修正函数；z_{0m} 是动量的粗糙长度；z_{0h} 是热的粗糙长度；d_0 是位移高度；u 是高度 z_u 的风速；z_T 是温度 T_a 对应的高度。

LE 从参考地点的外推：

$$LE=LE_r-[(1+c)a_s-(1-c_r)a_{sr}+c_r-c]R_{sr}+\sigma\varepsilon_{sr}[(1+c)T_s^4-(1+c_r)T_{sr}^4]+\rho c_p(T_s-T_{sr})/r_{ahr}+\sigma\varepsilon_{ar}T_{ar}^4(c_r-c)$$

(2) 时间外推方法：

Shuttleworth 等发现蒸发比例值 EF 对大部分白天时段基本上是常数，因而在日中时的估计值可以作为白天时段的平均值，而"瞬时"蒸发比例值可用下式计算：

$$EF=-LE/(R_n+G)$$

叶冠的热点效应的模型

Qin W, Xiang Y：对叶冠的热点效应的模型研究及叶片形状的影响 Remote Sensing of Environment, 1994, 50

(1) Kuusk(1985)提出了一个叶冠的接合概率的表达式：

$$P(r_i,r_v,z)=a(r_i,z)a(r_v,z)C_{HS}(r_i,r_v,z)$$

式中，$a(r,z)$ 是冠层中厚度 z 处沿方向 $r(\theta,\varphi)$ 的间隙概率；而 θ 和 φ 分别是方向 r 的天顶角和方位角；下标 i 和 v 分别定义了光照方向和视角方向；C_{HS} 是热点因子，可用下面的公式进行计算。

$$C_{HS}(r_i,r_v,z)=\exp\left[\int_0^z\sqrt{\frac{G(r_i,z')G(r_v,z')}{\mu_i\mu_v}}\mu_L(z')Y(d)dz'\right]$$

式中，$G(r,z')$ 是 Ross-Nilson G-函数(单位面积叶片在 r 方向上的投影)；μ_L 是区域 z' 中的叶面积密度；$\mu=\cos\theta$；$\Delta(r_i,r_v)=\sqrt{\mu_i^{-2}+\mu_v^{-2}-\cos(r_i\cdot r_v)/(\mu_i\mu_v)}$；$d=(z-z')\Delta(r_i,r_v)$；$Y$ 称为交叉相关函数，$Y(d)=\exp(-d/l_L)$ 这里 l_L 是叶片的平均线度。

(2) 利用几何光学原理，结合概率的一般表达式也可表示为(Jupp and Strahler, 1991)：

$$P(r_i,r_v,z)=\exp\left\{-\int u_L(z')\left[\frac{A(r_i,z')+A(r_v,z')}{L(z)}-S(r_i,r_v,d)\right]dz'\right\}$$

式中，$L(z)$是在区域 z 中叶片的单面平均面积；$A(r,z')$ 是中心在区域 z' 的叶沿方向 r 投影到区域 z 中的平均面积，$S(r_i,r_v,d)=\dfrac{A_0(r_i,r_v,d)}{L(z)}$ 被称为重叠函数，$A_0(r_i,r_v,d)$ 是同一片叶子沿两个方向(即光照方向和视角方向)的投影的重叠的平均面积，在重叠函数的圆盘模型中，$S(d)=\begin{cases}(v-\sin v)/\pi & (0<d/D_L\leq 1)\\ 0 & (\text{其他})\end{cases}$，$v=2\cos^{-1}(d/D_L)$，$D_L$ 是圆盘的直径。

共同的叶片的两个投影集 $A(r_i)$ 和 $A(r_v)$ 的重叠面积 A_0 可表示为：

$$A_0(r_i,r_v,d)=\frac{1}{2\pi}\int_0^\infty n_L(a_L,z')\eta(a_L,z')\times$$

$$\int_{2\pi^+}A_{0Le}(r_i,r_v,r_L,a_L,d)g_L(r_L,z')d\Omega_L da_L$$

式中，$A_{0Le}(r_i,r_v,r_L,a_L,d)=I_m(r_i,r_v)A_{0L}(r_i,r_v,r_L,d)$；$I_m(r_i,r_v)=1-i_m(r_i)-i_m(r_v)+i_m(r_i)\cdot i_m(r_v)$；$n_L$、$\eta$、$g_L$、$i_m$ 和 A_{0L} 是参数。

(3) 叶片形状对整个冠层的热点效应的影响：整个冠层的交叉相关函数 Y 可表示为：

$$Y(r_i,r_v,t)=\sqrt{I_m(r_i,r_v)}\times 1-(t/\pi m)[2(1+m)-t] \quad (t\leq m)$$

$$\begin{cases}\{2[\xi-\tan(\xi/2)]-m\}/\pi & (m<t\leq 1)\\ \dfrac{2[\xi-\tan(\xi/2)-\zeta+\tan\zeta]-m}{\pi}-\dfrac{(t-1)^2}{\pi m} & (1<t\leq\sqrt{1+m^2})\\ 0 & (\text{其他})\end{cases}$$

式中，$\xi=\sin^{-1}(m/t)$；$\zeta=\cos^{-1}(1/t)$。

蓄积量的计算机模拟

李飞：我国用材林资源的计算机模拟及其发展趋势预测．自然资源，1994，1

(1) 未成林造林地的进界蓄积量 X_0 模型：

$$\frac{dX_0}{dt}=AU+M_{RX_3}^{-1}$$

式中，AU 为人工造林的贡献量；$M_{RX_3}^{-1}$ 为迹地更新的贡献量。

(2) 幼龄林、中龄林和成熟林的蓄积量模型：

$$\frac{dX_1}{dt}=X_0+(P_1-MO_1-LO_1)X_1$$

$$\frac{dX_2}{dt}=MO_1X_1+(P_2-MO_2-LO_2)X_2$$

$$\frac{dX_3}{dt}=MO_2X_2+(P_3-LO_3)X_3$$

式中，$\dfrac{dX_i}{dt}(i=1,2,3)$ 分别为幼龄林、中龄林和成熟林的蓄积量变化率；P_i 为各龄级林木的年均生长率；MO_i 为各龄级林木的进界蓄积量比率；LO_i 为各龄级的损失率。

(3) 采伐后的成熟林蓄积量 Y 模型：

$$Y=X_3-MC(1+YR)^{t-1}$$

式中，YR 为年均资源消耗递增率；t 为时间；其他同上。

中国自然致灾因子特征值

王静爱，史培军，朱骊：中国主要自然致灾因子的区域分异 地理学报，1994，49(1)

(1) 自然致灾因子多度：

$$M=\frac{n}{N}$$

式中，n 为某县域自然致灾因子数；N 为全国自然致灾因子数；M 为该县域自然致灾因子多度(%)。

(2) 相对自然致灾因子强度：

$$S=\sum_{i=1}^{n}P_iS_i$$

式中，P_i 为第 i 种致灾因子的相对强度；S_i 为第 i 种致灾因子的面积比；S 为相对自然致灾因子强度。

(3) 被灾指数：

$$C=\sum_{i=1}^{n}S_i$$

旋钮构造的数学模型

毕仲良：胶东地区旋钮构造的遥感探测。环境遥感，1994，9(3)

$$Q=\frac{\omega_0}{2c}\int e^{-(A/2v)r^2}\mathrm{d}r$$

式中，A 为常数；v 为流体的黏滞率；ω_0 为半径 r 等于砥柱半径 r_0 处的涡度；c 为径向运动速度；Q 为涡旋运动旋转角度。

水资源价值耦合模型

姜文来，王华东，王淑华等：水资源耦合价值研究 自然资源，1995，2

$$V=(V_1-V_2)-(V_3+V_4)$$

$$V_2=\frac{1}{2}(V_{2a}+V_{2b})$$

$$V_{2a}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{V_i'}{\overline{W}_i'}\cdot\frac{k_i}{k_i'\cdot\frac{\overline{W}_i}{\overline{W}_i'}+k_i}$$

$$V_{2b}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{W_i}\cdot\varepsilon_i\cdot P_i(Y_i-Y_0)$$

$$V_4=-\frac{\sum J_i+\sum W_i+\sum L_i}{Q}$$

$$\sum L_i=R\cdot\sum_i A_iB_i$$

式中，V 为水资源耦合价值；V_1 为水资源本身价值；V_2 为水资源参与生活生产所增加价值；V_3 为生产水资源产品投入价值；V_4 为污水资源所造成的各种经济损失；V_{2a} 为工业用水增加的价值，n 为水利工程供水的工业部门数、V_i' 为第 i 部门当年的总净产值、$\overline{W}_i$ 为水利工程对第 i 工业部门的净供水量、$\overline{W}_i'$ 为第 i 部门当年全部净用水量，k_i 为第 i 部门应分摊的水利工程固定资产值，k_i' 为第 i 部门当年固定资产总值；V_{2b} 为水资源资产用于灌溉增加值，W_i 为灌溉净用水量，i 为农作物，n 为农作物种类数，ε_i 为不同水文年不同作物灌溉增产效益分摊系数，P_i 为 i 种作物的价格、Y_i 为 i 种作物当年产量，Y_0 为 i 种作物灌溉前的产量；V_4 为水资源的负价值、$\sum J_i$ 为治理污水所投入各种费用、$\sum W_i$ 为污水所造成的直接经济损失，$\sum L_i$ 为污水引发的间接经济损失，R 为就业人员每年创造的价值，i 为因水污染而造成的某种疾病，A_i 为 i 疾病的发病率，B_i 为 i 疾病引起的劳动力丧失时间、Q 为污水总量。

AVHRR 分割窗口温度差与大气在陆地表面可降水量关系的模拟模型

Choudhury B J, Dorman T J, Hsu A Y：AVHRR 分割窗口温度差与大气在陆地表面可降水量间关系的模拟及观测 Remote Sensing of Environment, 1995, 51

根据以 LOWTRSN-7 编码给出 23km 的可见度下的 6 个大气剖面，对黑体表面(是海洋表面的很好的近似)，可得到下面的线性回归关系：

$$\Delta T=-0.15+0.050W \qquad r^2=0.98$$

式中，ΔT 是分割窗口温度差；W 是大气中可降水量。

(1) 对在植被表面上的线性关系：

$$\Delta T=0.01+0.045W$$

(2) 对沙漠表面，可得到下面的关系：

$$\Delta T=-0.62+0.063W$$

(3) 对砂质土地：

$$\Delta T=1.03+0.015W$$

(4) 在 5 km 的可见度下，可得到下面的关系：

$$\Delta T=0.18+0.049W$$

土壤水分的遥感微波测量模型

Engman E T, Chauhan N：土壤水分的遥感微波测量的现状
Remote Sensing of Environment, 1995, 51

1. 微波技术

微波亮度温度(T_B)可表示为：

$$T_B = t(H)\cdot[rT_{sky} + (1-r)T_{soil}] + T_{atm}$$

式中，$t(H)$是土壤上方高度H处的辐射计的大气透射率；r是光滑表面的反射率；T_{soil}是土壤的温度，T_{atm}是大气的平均温度；T_{sky}是天空亮度反射的贡献部分。

忽略T_{atm}和T_{sky}这两项，T_B可简化为：

$$T_B = eT_{soil}$$

式中，e是辐射率，依赖于土壤的介电常数和地表粗糙度。

反射系数可表示为：

$$R = \frac{\cos\theta - \beta}{\cos\theta + \beta}$$

式中，$\beta = (\varepsilon - \sin^2\theta)^{1/2}$；$\theta$是入射角。

2. 测量深度

微波在土壤中的穿透深度δp可表示为：

$$\delta p = k\left|\mathrm{Im}\sqrt{\varepsilon}\right|$$

式中，$k = 2\pi/\lambda$是在自由空间中的传播波数；ε是土壤的介电常数；Im表示取复数的虚数部分。

3. 表面粗糙度

Choudhury等已经表明地表粗糙度会影响土壤的反射率r'：

$$r' = r\exp(-h\cos^2\theta)$$

式中，r是光滑地表的反射率；h是粗糙度参数($=4\sigma^2k^2$)，正比于地表高度变化的均方根；θ是入射角。

假设随机粗糙度的影响与入射角无关，则有：

$$r' = r\exp(-h)$$

4. 植被覆盖

植被可处理为一个吸收层，并可通过表示为植被水分含量的量化关系：

$$M_v = 78.9 - 78.4[1 + (e-1)\exp(0.22W)]$$

式中，M_v是单位体积土壤水分；e是观测辐射率；W是植被水分。

气孔生理学模型

Bonan G B：气候系统模型的陆地-大气相互作用：结合生物物理学、生物地球化学和生态系统的动力学过程 Remote Sensing of Environment, 1995, 51

叶气孔阻力(r_s)可用下式计算：

$$\frac{1}{r_s} = \frac{mAe_sPf(\psi)}{C_se_*(T)} + \frac{1}{r_{s,max}}$$

式中，$m=9$，e_s和C_s分别是叶表面的水蒸气压和CO_2浓度(Pa)；P是大气压(Pa)；$e_*(T)$是饱和水蒸气压(Pa)；A是叶片的光合作用率；$r_{s,max}$是当$A=0$时的最大气孔阻力($s\cdot m^2\cdot \mu mol$)；$f(\psi)$模拟了当低叶片水位势时气孔的关闭。

NPP的CASA模型

Field C B, Randerson J T, Malmström C M：全球净初级生产力：生态学与遥感方法的结合．Remote Sensing of Environment, 1995, 51

$$NPP = S(x,t)\cdot F_{PAR}(x,t)\cdot \varepsilon^* T_1(x,t)\cdot T_2(x,t)\cdot W(x,t)$$

式中，S是表面日光辐照度；F_{PAR}是绿色植物吸收的光合作用有效的辐射的百分比，即辐射转化为植物生物量的效率；ε^*是ε的最大值；W表示可能获得的水分量；T表示温度的适宜度；T_1对某种特定的生活环境设定的适应性极限；T_2假定了植物对某个特定位置季节性温度轨迹的适应性；x和t表示地理位置和时间。

耦合多谱段卫星数据的Sahelian草原区域性模型 I

Mougin E, Seen D L, Rambal S et al：耦合多谱段卫星数据的Sahelian草原的区域性模型 I 模型描述及校正．Remote Sensing of Environment, 1995, 52

(1) 生长模型：

在时间t存在的总的生物量B_T：

$$B_T(t) = B_G(t) + B_D(t) + B_L(t)$$

总的立地生物量$B_{AT}(t)$：

$$B_{AT}(t) = B_G(t) + B_D(t)$$

式中，B_G是活的或绿色的生物量；B_D是立地的死生物量；B_L是凋落生物量，所有量都表示为每公顷干物质的质量($kg\cdot hm^{-2}$)。

$$dB_G/dt = P_g - R_t - S$$

$$dB_D / dt = S - L$$

$$dB_L / dt = L - D$$

式中，P_g 是总光合作用；R_t 是呼吸作用损失；S 是寿命；L 是凋落率；D 是凋落物分解率。

(2) 光合作用模型：

$$P_g = (C_a - C_i)/(1.64r_s + r_m - 1.39r_a)$$

式中，P_g 是总的光合作用；C_a 和 C_i 分别是环境中和叶绿素中 CO_2 的分压；r_s、r_m 和 r_a 分别定义了叶冠气孔、叶肉及冠层边界处对水分的阻力。

(3) 呼吸模型：

生长呼吸量 R_c：

$$R_c = (1 - Y_G)P_G(1 - pr)$$

式中，Y_G 是生长转换率；pr 是总光合作用光呼吸的恒定分数。

维持呼吸量 R_m：

$$R_m = mY_G B_G$$

式中，B_G 是生存空间的单位面积的生物数量；m 是维持系数 (d^{-1})。

总呼吸量 R_t：

$$R_t = P_g[1 - Y_G(1 - pr)] + mY_G B_G$$

(4) 衰老模型：

$$S = s B_G$$

式中，s 是衰老率。

(5) 水预算模型：

水流量：

$$\Psi_{s,i} = a_i \theta_i^{-b_i}$$

式中，$\Psi_{s,i}$ 与 θ_i 分别代表第 i 层面的土壤水潜存量和土壤水容量($m^3 \cdot m^{-3}$)；a_i 与 b_i 是关于土壤粗密度的两个常量。

土壤水容量的变异可以很好地用 θ_i 来表达：

$$d\theta_i / dt = D_{i-1} - AET_i - D_i$$

式中，D_i ($mm \cdot j^{-1}$) 是第 i 层土壤的排水流量；AET_i 是第 i 层土壤对实际土壤水分蒸发蒸腾损失总量的贡献，即：第 i 层土壤的土壤蒸发 E_i 和植物蒸腾 Tr_i 的总量，$E = (1/r_{ss})PE$、$Tr = (1/r_c)PTr$、PE 与 PTr 代表潜在的蒸发量和潜在的蒸腾量，r_{ss} 是土壤表面阻力，r_c 是遮篷植被阻力。

耦合多谱段卫星数据的 Sahelian 草原区域性模型 II

Seen D L, Mougin E, Rambal S et al：耦合多谱段卫星数据的 Sahelian 草原区域性模型 II——通过遥感指数对模拟的调控. Remote Sensing of Environment, 1995, 52

(1) 景观反射率的简单面积加和模型：

$$R = f_{vD} \cdot R_D + f_{vG} \cdot R_G + (1 - f_{vD} - f_{vG}) \cdot R_s$$

式中，R 是在生长季节中的任一天在给定波段景物的反射率；R_D、R_G 和 R_s 分别是干枯叶片、绿色叶片和土壤的反射率；f_{vD} 和 f_{vG} 是参数。

(2) 土壤反射率的模型：

$$R_S(i,e,\Psi) = \frac{\omega}{4}\frac{1}{\cos i + \cos e}\{[1 + B(g)]P(g,g') + H(\cos i)H(\cos e) - 1\}$$

式中，ω 是单一散射漫反射率；相位角 g ($\cos g = \cos i \cos e + \sin i \sin e \cos\Psi$) 是入射与出射光线的夹角；相函数 $P(g,g')$ 描述了光线散射的角分布；g' ($\cos g' = \cos i \cos e - \sin i \sin e \cos\Psi$) 是镜向方向与出射光线的夹角；后向散射函数 $B(g)$ 表征了反相效应；$H(x)$ 是 Hapke 提出的对各向同性问题的近似解。

土地覆盖类型辨识模型

DeFries R, Hansen M, Townshend J：根据从 AVHRR Pathfinder 数据得出的规律对全球土地覆盖类型进行辨识。Remote Sensing of Environment, 1995, 54

(1) 土地表面温度从 AVHRR 的 4 波段(10.3~11.3 μm)和 5 波段(11.5~12.5μm)计算而得：

$$T_s = T_{b4} + 3.3(T_{b4} - T_{b5})$$

式中，T_s 是土地表面温度；T_{b4} 和 T_{b5} 分别为从 4 波段和 5 波段得出的温度。

(2) Bhattacharya 距离利用下式计算：

$$BD(i,j) = 2[1 - \exp(-a(i,j))]$$

式中，$BD(i,j)$ 是在覆盖类型 i 类和 j 类之间的 Bhattacharya 距离。

$a(i,j)$ 的计算公式可表达为：

$$a(i,j) = 0.125\ T[M(i) - M(j)] \times \mathrm{Inv}\{A(i,j) \cdot [M(i) - M(j)]\} + 0.5 \times \ln\{\det(A_{i,j}) / \mathrm{SQRT}[\det[S(i) \cdot \det(S(j))]]\}$$

式中，T 是矩阵转置算符；$M(i)$ 是类型 i 的平均矢量，它有 N 个波段的成分；$S(i)$ 是类型 i 的协方差矩阵；Inv 是矩阵求逆算符；$A(i,j)=0.5\times[S(i)+S(j)]$；Det()表示对矩阵求行列式值；ln{}是自然对数函数；SQRT[]是平方根函数。

地震灾害分析模型

李钜章：地震灾害宏观分析研究．地理研究，1995，14(2)

（1）抗灾力计算公式：

$$K=\lg(Fg)/10^{(J-5)}$$

式中，K 为一个地区对地震灾害的抗灾力；Fg 为单位面积工农业总产值；J 为地震烈度。

（2）人员伤亡计算公式：

$$\text{人员伤亡}(R)=\begin{cases}\text{死亡人数}+\dfrac{\text{重伤人数}}{1.5}+\dfrac{\text{轻伤人数}}{2.5}\\ \text{死亡人数}+\dfrac{\text{受伤人数}}{2}\end{cases}$$

（3）地震灾害宏观分析模型：

$$\lg R=0.856J+0.773\lg Rg-3.32K-5.96$$

$$r=0.89$$

$$\lg F=0.581J+0.851\lg Fg-5.10K-2.93$$

$$r=0.81$$

式中，J 为地震烈度；Rg 为人口密度；Fg 为产值密度；K 为抗震水平。

三"S"一体化技术的系统模型

刘震，李树楷：三"S"一体化技术和方法的探讨．环境遥感，1995，10(2)

$$T(s)=\sum_{k=1}^{\infty}C_k\cos\left(\frac{2k\pi}{L}s-\varphi_k\right)$$

$$k=1,2,\cdots,\infty$$

式中，φ_k 为相位；C_k 为振幅。

自然灾害程度的指标体系及灾情变率计算公式

刘燕华，李钜章，赵跃龙：中国近期自然灾害程度的区域特征．地理研究，1995，14(3)

（1）灾情定量指标计算公式：

$$Ga_i=\lg N_i$$

式中，Ga_i 为第 i 种指标绝对灾情等级指标；N_i 为 i 种指标实际的灾情统计

（2）绝对灾级计算公式：

$$Ga=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\lg N_i$$

式中，Ga 为绝对灾级；n 为指标个数。

（3）相对灾级计算公式：

$$Gr=(P_1+P_2+2P_3)/3$$

式中，Gr 为相对灾级；P_1 为受灾人口占总人口百分比；P_2 为受灾面积占总播面积百分比；P_3 为直接经济损失占工农业总产值滑动平均值百分比。

（4）灾情变率计算公式：

$$ST=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}(X_i-\overline{X})^2}{m}}$$

式中，ST 为灾情变率；X_i 为某一年的灾情指标；$\overline{X}$ 为多年的灾情指标平均值；m 为年份。

流域干燥指标及人类活动影响径流的强度指标

许炯心：我国东部季风区不同自然带年径流量特征及人类活动影响的比较研究．地理研究，1995，14(3)

（1）流域干燥指标计算公式：

$$I_d=\frac{E_a}{P}$$

式中，I_d 为流域干燥指标；E_a 为流域多年平均实际蒸发量；P 为流域多年平均降水量。

（2）人类活动影响径流的强度指标计算公式：

$$I_m=\frac{Q_n-Q_m}{Q_n}$$

式中，I_m 为人类活动影响径流的强度指标；Q_n 为经还原计算后的天然径流量。

资源利用者对资源的利用关系、共存系统模型

曹启武，李文焰，刘家明：资源与资源利用者共存系统的数学模型初探．自然资源学报，1995，10(4)

（1）营养动力学的基本方程 Michalis-Menten 方程：

$$\frac{dY}{dt}=\frac{\mu_X XY}{K_X+X}$$

式中，Y 为资源利用者密度；X 为资源密度；K_X 为米氏常数；μ_X 为资源利用者增值速度参数

（2）资源动态：

$$\frac{dx}{dt}=\mu_c X\frac{1-\frac{X}{X_m}}{1-\frac{X}{X_m}}-\mu_X\frac{XY}{K_X+X}$$

(3) 资源利用者动态：

$$\frac{dY}{dt}=\mu_Y\frac{XY}{K_X+X}-VY$$

式中，资源动态表示资源的自然增长和被消耗(利用)的动态；资源利用者动态表示资源利用者利用资源所得增长和自然死亡的动态；V 为自然死亡率参数。

CLAIR 模型与 Cloud 模型

Clevers J G W, Leeuwen H J C：农作物生长监视中光学遥感数据与微波遥感数据的组合应用　Remote Sensing of Environment, 1996, 56

(1) 应用 CLAIR 模型估计叶片面积指数 A：

$$I_{wdv}=R_{ni}-C\cdot R_{red}$$

式中，I_{wdv} 是加权植被差异指数；R_{ri} 是测量的近红外光反射率；R_{red} 是测量的红光反射率；C 是相应土地方向的坡度。

$$I_{la}=-1/\alpha\cdot\ln(1-I_{wdv}/I_{wdv\infty})$$

式中，α 是描述 I_{wdv} 趋向于其渐近值的速率的参数；$I_{wdv\infty}$ 是 I_{wdv} 的渐近极限值。

I_{la} 估计的标准偏差的一阶近似为：

$$\delta(I_{la})=\exp[\alpha\cdot I_{la}-\ln(\alpha\cdot I_{wdv\infty})]\cdot\delta(I_{wdv})$$

(2) 应用 Cloud 模型估计 I_{la}

投影在发射方向上的单位面积雷达截面 γ：

$$\gamma=C\{1-\exp(-D\,W\,h/\cos\theta)\}+G\exp[(B\,m_s-D\,W\,h)/\cos\theta]$$

式中，参数 C 表示完全郁闭的叶冠的雷达反向散射率；G 是计入了粗糙信息的干燥土壤的反向散射特性；D 是雷达波穿过叶冠时的双程衰减；B 是反射散射对土壤湿度的灵敏因子；W 表示了叶冠的水分含量，h 等于叶冠高度；m_s 是土壤的体积水分含量；θ 是雷达波的入射角。

糖用甜菜的 I_{la} 的方程为：

$$I_{la}=-\cos\theta/D'\ln[(\gamma-C)/(-K)]$$

式中，$K=C-G\exp(B\,m_s)$；$D'=D/A$。

I_{la} 计的标准偏差的一阶近似为：

$$\delta(I_{la})=\cos\theta/(K\,D')\exp(D'\,I_{la}/\cos\theta)\,\delta(\gamma)$$

生态变化遥感监测评价模型

高世忠，周万村，范建容等：森林火灾后生态变化遥感监测评价模型的构建方法研究。环境遥感，1996，11(2)

(1) 残差平方和 sse 模型：

$$sse=\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2$$

(2) 回归平方和 ssr 模型：

$$ssr=\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i-\bar{y}_i)^2$$

(3) 复相关系数 r 模型：

$$r=\sqrt{1-\frac{sse}{sse+ssr}}$$

(4) 显著性检验量 F 模型：

$$F=\frac{ssr/m}{sse/(n-m+1)}$$

式中，$\bar{y}=\sum_{i=1}^{n}\frac{y_i}{n}$；$\hat{y}_i$ 为由回归模型计算的估计值；n 为样本个数；m 为自变量个数。

土壤-植被-大气连续体中蒸散过程的数值模式

刘树华，黄子琛，刘立超：土壤-植被-大气连续体中蒸散过程的数值模拟。地理学报，1996，51(2)

(1) 大气子系统模式：

$$\frac{\partial u}{\partial t}=f(v-v_g)+\frac{\partial}{\partial z}K\frac{\partial u}{\partial z}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}=f(u_g-u)+\frac{\partial}{\partial z}K\frac{\partial v}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}K\frac{\partial \theta}{\partial z}$$

$$\frac{\partial q}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}K\frac{\partial q}{\partial z}$$

式中，u，v，θ 和 q 分别为风速分量、位温和比湿；f 为科氏参数 ($10^{-4}s^{-1}$)；u_g 和 v_g 为地转风速风量 ($u_g=10m\cdot s^{-1}, v_g=0$)；$k$ 为大气湍流交换系数。

(2) 植被子系统模式：假设冠层是水平均匀的，厚度等于植株的平均高度，并忽略植被层中的热量储存和水平输送，则冠层内的热量平衡方程为：

$$(S_{h\downarrow}-S_{h\uparrow})+(L_{h\downarrow}-L_{h\uparrow})+(H_h+\lambda E_h)-(S_{g\downarrow}-S_{g\uparrow})-(L_{g\downarrow}-L_{g\uparrow})-(H_g+\lambda E_g)=0$$

式中，S 和 L 分别表示短波和长波辐射通量；H 和 λE 分别表示显热和潜热通量；脚标 h 和 g 分别表示植被顶面和地面；$\lambda=2.5\times10^6\,\mathrm{J\cdot kg^{-1}}$ 为水汽化潜热。

(3) 土壤表面热量平衡方程：

$$(1-A_g)S_{g\downarrow}+L_{g\downarrow}-L_{g\uparrow}-H_g-\lambda E_g=G$$

式中，A_g 为地面对短波辐射的反射率；G 为进入或支出的土壤热通量。

自转地球上板块的运动态势

金明德：地球自转引起大陆板块向赤道漂移的动力，地理学报，1996，51(2)

(1) 主矢：

$$F_c=(m_1-m_{01})\omega^2(r_1-r_2)(r/r_1)=(m_1-m_{01})\omega^2\cdot\overline{c_1c_2}\cdot\cos(r/r_1)$$

式中，F_c 为主矢；r_1 和 r_2 分别为质心 c_1 和 c_2 到地轴的距离；ω 为角速度；m_1 和 m_{01} 分别为板块上部及其排开同体积软流的质量。

(2) 主矩：

$$M_c=[c_1c_2\cdot\sin\varphi\cdot F_{c_2}+c_1c_2\cdot\sin\varphi\cdot F_c]K$$

式中，M_c 为主矩；φ 为质心所在纬度；K 为主矩方向沿纬圈指向东的单位矢量；$F_{c_2}=(m_2-m_{02})\omega^2 r_2$，$r_1$ 和 r_2 分别为 c_1 和 c_2 相对地球转轴的位置矢量，m_2 和 m_{02} 分别为板块下部及其排开同体积软流的质量。

库区劳动力资源预测的基本模型

陈国阶，李鼎甲：三峡库区劳动就业态势与对策，地理研究，1996，51(2)

$$P_{x+1,(t+1)}=P_x(t)\cdot S_x$$

式中，$P_{x+1,(t+1)}$ 为预测年 x+1 岁人口数；$P_x(t)$ 为初始年 x 岁人口实际人口数；S_x 为 x 岁人口之存活率。

山地、湖泊的三维大气-斜压水动力学耦合模式

张利民，濮培民：山地、湖泊的三维大气-斜压水动力学耦合模式，地理学报，1996，51(2)

(1) 大气边界层三维数值模式：

$$\frac{\partial u}{\partial t}=-u\frac{\partial u}{\partial x}-v\frac{\partial u}{\partial y}-w^*\frac{\partial u}{\partial z}-\Theta\frac{\partial\pi'}{\partial x}+g\frac{\theta'}{\Theta}\frac{z_H-z^*}{z_H}\frac{\partial z_G}{\partial z}+f(v-v_g)+\left(\frac{z_H}{z_H-z_G}\right)^2\frac{\partial}{\partial z^*}\left(K_z\frac{\partial u}{\partial z^*}\right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}=-u\frac{\partial v}{\partial x}-v\frac{\partial v}{\partial y}-w^*\frac{\partial v}{\partial z^*}-\Theta\frac{\partial\pi'}{\partial y}+g\frac{\theta'}{\Theta}\frac{z_H-z^*}{z_H}\frac{\partial z_G}{\partial y}+f(u-u_g)+\left(\frac{z_H}{z_H-z_G}\right)^2\frac{\partial}{\partial z^*}\left(K_z\frac{\partial v}{\partial z^*}\right)$$

$$\frac{\partial\theta'}{\partial t}=-u\frac{\partial\theta'}{\partial x}-v\frac{\partial\theta'}{\partial y}-w^*\frac{\partial\theta'}{\partial z^*}+\left(\frac{z_H}{z_H-z_G}\right)^2\frac{\partial}{\partial z^*}\left(K_z\frac{\partial\theta'}{\partial z^*}\right)+F_N$$

$$\frac{\partial q}{\partial t}=-u\frac{\partial q}{\partial x}-v\frac{\partial q}{\partial y}-w^*\frac{\partial q}{\partial z^*}+\left(\frac{z_H}{z_H-z_G}\right)^2\frac{\partial}{\partial z^*}\left(K_z\frac{\partial q}{\partial z^*}\right)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w^*}{\partial z^*}-\frac{1}{z_H-z_G}\left(u\frac{\partial z_G}{\partial x}+v\frac{\partial z_G}{\partial y}\right)=0$$

$$\frac{\partial\pi'}{\partial z^*}=\frac{z_H\quad z_G}{z_H}\frac{g\theta'}{\Theta^2}$$

式中，$z^*=z_H\dfrac{z-z_G}{z_H-z_G}$ 为地形坐标；u，v 和 w 分别为 x，y 和 z 方向上的风速分量；$w^*=\dfrac{z_H}{z_H-z_G}w+\dfrac{z^*-z_H}{z_H-z_G}\left(u\dfrac{\partial z_G}{\partial x}+v\dfrac{\partial z_G}{\partial y}\right)$，$w^*$ 为转换坐标下的垂直风速；θ' 和 q 分别为位温与参考状态值的偏差和比湿；$\theta'=\theta-\Theta$；$\pi=\pi-\Pi-\dfrac{f}{\Theta}(u_gx-u_gy)$，$\Pi$ 和 Θ 分别为 π 函数及位温 θ 在参考状态下的值；u_g 和 v_g 为地转风速的两个分量，f 为地转参数；z_H 为模式顶高度；z_G 为地形高度；F_N 为辐射冷却率；

$\pi = C_p\left(\frac{p}{p_\infty}\right)^{R/C}$；$x$ 轴正向指东；y 轴正向指北；K_z 为交换系数。

(2) 三维斜压水动力数值模式：

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial t}+\frac{\partial \tilde{u}\tilde{u}}{\partial \tilde{x}}+\frac{\partial \tilde{u}\tilde{v}}{\partial \tilde{y}}+\frac{\partial \tilde{u}\tilde{w}}{\partial \tilde{z}}-f\tilde{v}=-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}}+A_v\frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \tilde{z}^2}+A_h\nabla^2\tilde{u}$$

$$\frac{\partial \tilde{v}}{\partial t}+\frac{\partial \tilde{u}\tilde{v}}{\partial \tilde{x}}+\frac{\partial \tilde{v}\tilde{v}}{\partial \tilde{y}}+\frac{\partial \tilde{v}\tilde{w}}{\partial \tilde{z}}+f\tilde{u}=-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{y}}+A_v\frac{\partial^2 \tilde{v}}{\partial \tilde{z}^2}+A_h\nabla^2\tilde{v}$$

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial t}+\frac{\partial \tilde{u}\tilde{T}}{\partial \tilde{x}}+\frac{\partial \tilde{v}\tilde{T}}{\partial \tilde{y}}+\frac{\partial \tilde{w}\tilde{T}}{\partial \tilde{z}}=K_{\tilde{x}}\frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{x}^2}-K_{\tilde{y}}\frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{y}^2}+K_{\tilde{z}}\frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{z}^2}$$

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}}+\frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{y}}+\frac{\partial \tilde{w}}{\partial \tilde{z}}=0$$

$$\tilde{\rho}=\rho_0(1-\alpha\tilde{T})$$

$$\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{z}}=-\tilde{\rho}g$$

式中，$\tilde{x}$ 轴向东为正；$\tilde{y}$ 轴向北为正；$\tilde{z}$ 轴由水面向下为正；$\tilde{\rho}$ 为湖水密度；ρ_0 为平均湖水密度；$\tilde{p}$ 为压强；$\tilde{T}$ 为湖水温度；$\tilde{u}$，$\tilde{v}$ 和 $\tilde{w}$ 分别为 $\tilde{x}$，$\tilde{y}$ 和 $\tilde{z}$ 方向上的流速；α 为水的热膨胀系数；A_h 和 A_v 分别为水平、垂直方向上的湍流黏性系数；$K_{\tilde{x}}$，$K_{\tilde{y}}$ 和 $K_{\tilde{z}}$ 分别为 $\tilde{x}$，$\tilde{y}$ 和 $\tilde{z}$ 向上的涡旋扩散系数；f 为科氏系数；g 为重力加速度。

(3) 大气边界层、水动力三维耦合模式：

$$Q=-Q_s+Q_b+Q_e+Q_c$$

$$Q_s=Q_{s_0}(1-0.71C)(1-r)$$

$$Q_b=s\sigma T_a^4(0.39-0.58E_a)(1-cC^2)+4s\sigma T_a^3(T_w-T_a)$$

$$Q_e=L\tilde{\rho}E_{vap}$$

$$Q_c=\rho_a C_p K_z\left.\frac{\partial T_a}{\partial z}\right|_{z=0}$$

$$E_{vap}=0.12\times10^{-5}|v|_{z=0}(E_w-E_a)$$

$$K_z\rho\left.\frac{\partial \tilde{v}}{\partial z}\right|_{z=0}=-A_v\tilde{\rho}\left.\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{z}}\right|_{\tilde{z}=0}$$

$$Q=K_{\tilde{z}}\tilde{\rho}C_w\left.\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{z}}\right|_{\tilde{z}=0}$$

式中，Q 为水中向上湍流的热通量；C_p 和 C_w 分别为气、水等压比热；T_a，T_w，E_a 和 E_w 分别为近水面气温、水温、水汽压、(T_w 下)的饱和水汽压；C 为云量；Q_s 和 Q_{s_0} 是实际状况和无云状况下的太阳辐射强度；Q_b 为有效辐射；Q_c 和 Q_e 分别为湍流的感热通量和潜热通量；r 和 s 分别为水表面的短波反射率和长波发射率；σ 为 Stefan-Bolzman 常数；c 是与纬度有关的系数；L 为水的蒸发潜热。

温氏法回归方程

葛淼，国彩玲，南秀琴等：血沉参考值(温氏法)与中国地理因素的关系．地理研究，1996，15(3)

$\hat{Y}_1=13.76-0.002\,78X_1\pm6.83$　　$r_{11}=-0.653$

$\hat{Y}_1=13.66-0.0374X_2\pm6.83$　　$r_{12}=-0.064$

$\hat{Y}_1=0.11+0.177X_3\pm6.83$　　$r_{13}=0.433$

$\hat{Y}_1=9.38+0.251X_4\pm6.83$　　$r_{14}=0.385$

$\hat{Y}_1=9.53+0.003\,46X_5\pm6.83$　　$r_{15}=0.358$

$\hat{Y}_1=0.97-0.001\,71X_1+0.197X_2+0.0280X_3+0.0564X_4+0.003\,46X_5\pm6.83$　　$R_1=0.3665$

$\hat{Y}_2=22.18-0.004\,37X_1\pm8.72$　　$r_{21}=-0.503$

$\hat{Y}_2=23.13-0.0571X_2\pm8.72$　　$r_{22}=-0.091$

$\hat{Y}_2=7.67+0.183X_3\pm8.72$　　$r_{23}=0.272$

$\hat{Y}_2=16.99+0.285X_4\pm8.72$　　$r_{24}=0.282$

$\hat{Y}_2=18.15+0.0281X_5\pm8.72$　　$r_{25}=0.197$

$\hat{Y}_2=11.14-0.003\,34X_1+0.163X_2+0.0158X_3+0.122X_4+0.002\,81X_5\pm8.72$　　$R_2=0.504$

式中，$\hat{Y}_1$ 为男性血沉参考值；$\hat{Y}_2$ 为女性血沉参考值；X_1 为海拔高度；X_2 为北纬度数；X_3 为年均相对湿度；

X_4 为年均气温；X_5 为年降水量；6.83 为男性的 2 个标准差的值；8.72 为女性的 2 个标准差的值；R_1 为男性的复相关系数；R_2 为女性的复相关系数。

地理系统中的非均质空间随机扩散方程

牛卫东，包浩生：地理系统非均质空间扩散定量研究。地理学报，1996，51(4)

(1) 非均质空间各向同性随机扩散方程：

$$D(r,z)=\begin{cases} D_{\max}\cdot \mathrm{erfc}\left[\dfrac{r-\rho(z)}{\sqrt{4\sigma(z)}}\right] & (r>\rho(z)) \\ D_{\max}\cdot \mathrm{erfc}\left[\dfrac{\rho(z)-r}{\sqrt{4\sigma(z)}}\right] & (r<\rho(z)) \end{cases}$$

式中，r 为任一域元到扩散中心的距离；$z=m_0-m$，m 为该域元的综合质量，m_0 为扩散源的综合质量；$D(r,z)$ 为扩散要素的扩散值；$D_{\max}$ 为扩散源的革新值；$erfc(x)$ 为余高斯函数；$\rho(z)$ 为扩散偏移系数函数；$\sigma(z)$ 为扩散系数函数。

(2) 非均质空间各向异性随机扩散过程：

$$D(r,z)=D_{\max}\,D_i(r,z)\,D_{i+1}(r,z)$$

$$z=m_0-m$$

$$D_i(r,z)=\begin{cases} \mathrm{erfc}\left[\dfrac{r\cos^{\frac{2}{\pi}\theta_0}\dfrac{\pi\theta}{2\theta_0}-\rho_i(z)}{\sqrt{4\sigma_i(z)}}\right] & \left(r\cos^{\frac{2}{\pi}\theta_0}\dfrac{\pi\theta}{2\theta_0}>\rho_i(z)\right) \\ \mathrm{erfc}\left[\dfrac{\rho_i(z)-r\cos^{\frac{2}{\pi}\theta_0}\dfrac{\pi\theta}{2\theta_0}}{\sqrt{4\sigma_i(z)}}\right] & \left(r\cos^{\frac{2}{\pi}\theta_0}\dfrac{\pi\theta}{2\theta_0}<\rho_i(z)\right) \end{cases}$$

$$D_{i+1}(r,z)=\begin{cases} \mathrm{erfc}\left[\dfrac{r\sin^{\frac{2}{\pi}\theta_0}\dfrac{\pi\theta}{2\theta_0}-\rho_{i+1}(z)}{\sqrt{4\sigma_{i+1}(z)}}\right] & \left(r\sin^{\frac{2}{\pi}\theta_0}\dfrac{\pi\theta}{2\theta_0}>\rho_{i-1}(z)\right) \\ \mathrm{erfc}\left[\dfrac{\rho_{i-1}(z)-r\sin^{\frac{2}{\pi}\theta_0}\dfrac{\pi\theta}{2\theta_0}}{\sqrt{4\sigma_{i-1}(z)}}\right] & \left(r\sin^{\frac{2}{\pi}\theta_0}\dfrac{\pi\theta}{2\theta_0}<\rho_{i+1}(z)\right) \end{cases}$$

式中，r 为扩散轴 A_i 和 A_{i+1} 间任一域元到扩散源 O 的距离；θ_0 为 A_i 和 A_{i-1} 轴间的夹角；θ 为 A_i 轴与该域元到扩散源的连线间夹角；$\rho_i(z)$ 和 $\rho_{i+1}(z)$ 分别为 A_i 轴与 A_{i+1} 轴上的扩散偏移系数函数；$\sigma_i(z)$ 和 $\sigma_{i+1}(z)$ 分别为 A_i 轴与 A_{i+1} 轴上的扩散系数。

(3) 非均质空间多源随机扩散过程：

$$D_i=\sum_{j=1}^{n}D_j(r_{ij},z_{ij})$$

$$D_j=\begin{cases} D_{j\max}\mathrm{erfc}\left[\dfrac{r_{ij}-\rho_j(z_{ij})}{\sqrt{4\sigma_j(z_{ij})}}\right] & (r_{ij}>\rho_j(z_{ij})) \\ D_{j\max}\,\mathrm{erfc}\left[\dfrac{\rho_j(z_{ij})-r_{ij}}{\sqrt{4\sigma_j(z_{ij})}}\right] & (r_{ij}<\rho_j(z_{ij})) \end{cases}$$

式中，D_i 为任一域元 i 出现的革新值；$j=1,2,\cdots,n$ 表示该空间系统内有 n 个扩散源；$D_j(r_{ij},z_{ij})$ 为域元 i 接受第 j 个扩散源革新的扩散值；r_{ij} 为域元 i 到第 j 个扩散源的距离；z_{ij} 为第 j 个扩散源综合质量 m_j 与第 i 域元综合质量 m_i 的差；$\sigma_j(z_{ij})$，$\rho_j(z_{ij})$ 分别为第 j 个扩散源的扩散系数函数和扩散偏移系数函数。

(4) 非均质空间动态扩散方程：

$$C(r,z)=\begin{cases} D_{max}\text{erfc}\left[\dfrac{r-\rho(z)}{\sqrt{4\sigma(z)}}\right] \\ (r>\rho(z)) \\ D_{max}\text{erfc}\left[\dfrac{\rho(z)-r}{\sqrt{4\sigma(z)}}\right] \\ (r<\rho(z)) \end{cases}$$

$$D(r,z,\Delta t)=\frac{C(r,z)}{1+a\cdot e^{-k\Delta tC(r,z)}}$$

$$\Delta t=t-t_0$$

$$z=m_0-m$$

式中，$C(r,z)$ 为任一域地接受革新扩散的饱和值；$D_{max}(t_0)$ 为扩散源在 t_0 时刻的革新值；$D(r,z,\Delta t)$ 为任一域元的时刻 t 接受革新扩散的瞬时值；Δt 为 t 与 t_0 的时差；a 和 k 分别为与扩散时间和扩散速度有关的系数。

农田水分动态模型

梁季阳：华北平原节水灌溉的信息管理与实时操作模式．自然资源，1997，1

(1) 农田土壤水量平衡模型：

$$S_{w_i}=S_{w_{i-1}}+I_{r_i}+P_i-ET_i-R_i-DR_i$$

式中，$S_{w_{i-1}}$ 和 S_{w_i} 分别为计算时段始末的土壤含水量；I_{r_i} 为计算时段内的灌溉水量；P_i，ET_i，R_i 和 DR_i 分别为计算时段内的降水量、蒸散发量、径流量和测向排水量。

(2) 蒸散发量模型：

$$\text{ETR}-R_n=A-B(T_s-T_a)$$

式中，ETR 为日蒸散发量；R_n 为净辐射；T_s 为地面温度；T_a 为空气温度；A，B 为参数。

(3) 节水灌溉系统的目标函数模型：

$$\max Ben=\sum_{i=1}^{n}P_iY_{o,i}\left[\prod_{i=1}^{n}(ET/ET_o)_i^{\alpha}\right]-\sum_{i=1,j=1,k=1}^{n,m,3}I_{r_{i,j,k}}C_{i,j,k}$$

式中，Ben 为最大收益；P 为作物单价；Y_o 为充分供水时的作物产量；ET、ET_o 为作物供水受限制与无限制时的蒸散发量；α 为作物缺水影响产量的敏感指数；I_r 为灌溉水量；C 为单位灌溉用水价格；n 为作物地块划分数；m 为供水时期划分数；k 为供水水源，分为地表水、井水和引黄水 3 种。

光线衰减系数对于叶面积指数的优化调节模型

Alexandrov G A, Oikawa T：根据极值原理使用卫星数据计算陆地净初级产品的当代变化．Ecological Modelling, 1997, 95

(1) Kuroiwa 的 GPP 公式：

$$\text{GPP}(I_{la},K)=\frac{2Dp_{max}}{K}Gk\left\{\ln\left(1+\sqrt{1+K\beta I_{0max}/p_{max}}\right)-\ln\left[1+\sqrt{1+K\beta I_{0max}\exp(-KI_{la})/p_{max}}\right]\right\}$$

式中，I_{la} 是叶面积指数；K 是光线衰减系数，G 是生长期；D 是白天长度；I_{0max} 是中午最大日照强度；p_{max} 是单个叶片光线饱和时的光合作用率；β 是光合作用的量子产额；k 是吸收的 CO_2 合成干物质时的转换常数，这里暗示对应于某一 K 值；GPP 的极值依赖于 I_{la} 和 $K_{opt}(I_{la})$。

(2) 光线衰减系数和叶面积指数之间的关系：

$$K_{obs}(I_{la})=1.25I_{la}^{-0.88}$$

(3) FPAR 是 I_{la} 的单值函数：

$$\text{FPAR}=1-\exp(-1.25I_{la}^{0.12}/a^{0.88})$$

式中，a 是一个常数。

沙漠化灾害危险度综合评价模型

董玉祥：中国北方沙漠化灾害危险度分区评价．地理学报，1997，52(2)

$$MHD=(\alpha\cdot P+\beta\cdot E)\sum_{i=1}^{M}\left(W_i\cdot\sum_{j=1}^{N}V_{ij}\cdot F_{ij}\right)$$

式中，MHD 为沙漠化灾害危险度指数，其值域为[0，100]；P 和 E 分别代表社会经济发展水平的人口密度和人均纯收入指数，其值域为[0，10]；α (=0.5)和 β (=0.5)为相应的权重；W_i 为沙漠化过程五个评价方面中第 i 个评价方面相对于沙漠化过程的权重，它由 FAO 和 UNDP 制定的沙漠化危险度评价指数换算得出的；V_{ij} 为沙漠化过程第 i 个评价方面中第 j 个指标相对于其所属的评价方面的权重，它由特尔斐法确定；F_{ij} 为沙漠化过程第 i 个评价方面中第 j 个指标的自身

强度指数，其值域为[0，10]；M 为沙漠化过程自身强度的评价方面个数(M=5)；N 为沙漠化过程各评价方面中的指标数。

森林生物量计算公式

Ranson K J, Sun G, Weishampel J F et al：结合生态系统模型与雷达反射散射模型的森林生物量。Remote Sensing of Environment, 1997, 59

(1) 模型模拟生物量与模型模拟雷达反向散射间的回归方程：

$$B^{1/3} = 2.1566 + 0.1905(\text{PHH} - \text{CHH}) \quad r^2 = 0.93$$

式中，B 是从间隙型森林演替模型模拟的生物量；PHH 和 CHH 是根据雷达信道模拟的反向散射(dB)；

(2) 实测生物量与 AIRSAR 反向散射数据间的回归方程：

$$B^{1/3} = 2.117 + 0.324(\text{PHH} - \text{CHH})$$

式中，B 是野外实测生物量；PHH 和 CHH 是 AIRSAR 观测数据。

(3) 实测生物量与 AIRSAR 数据模拟生物量间的回归方程：

$$B_{(\text{image})} = 3.633 - 0.630B_{(\text{field})} \quad r^2 = 0.76$$

潜在蒸发量的全球模式

Choudhury B J：根据卫星及吸收数据利用 Penman-Monteith 方程计算潜在蒸发量的全球模式。Remote Sensing of Environment, 1997, 61

(1) 蒸发量方程：

一个月的平均日蒸发量 E_0 (mm)：

$$E_0 = \frac{\Delta R_{\text{ni}} + \rho c_{\text{p}} D/(c r_{\text{e}})}{\Delta + \gamma(r_{\text{s}} + r_{\text{H}})/r_{\text{e}}}$$

式中，Δ (hPa · K^{-1})是相应于温度[T_a(K)]的饱和水蒸气压的微分；γ(hPa · K^{-1})为湿度计的常数；R_{ni} (mm) 是等温净蒸发(isothermal net radiation)；ρ 和 c_p 分别是空气的密度和相应的热容量；D (hPa)是水蒸气压力差；r_s (s · m^{-1})是表面阻力；r_H (s · m^{-1})是热量从叶冠中实际的热源传到大气中某个参考高度的空气动力学阻力；r_e (s · m^{-1})是热传导的有效阻力，表达为 $r_e^{-1} = r_H^{-1} + r_R^{-1}$，$r_R = \rho c_p/(4\sigma\varepsilon T_a^3)$，$\sigma$ 是 Stefan-Boltzman 常数(=5.67×10^{-8} J · s^{-1} · m^{-2} · K^{-4})；ε 是表面长波发射率。

(2) 等温净蒸发(isothermal net radiation) R_{ni} (mm)：

$$R_{\text{ni}} = (1 - a)S - L_{\text{n}}$$

式中，a 是漫反射系数；S(mm)是平均日太阳辐射的水分当量；L_n (mm)是等温净长波辐射的水分当量，根据 Anderson-Efimova 方程，L_n 的计算公式可表达为 $L_n = (\varepsilon\sigma T_a^4/c)(0.254 - 0.00495e_a)(1 - \chi f)$，$e_a$ (hPa)是大气的水蒸气压，f 是云层覆盖率(月平均)，χ 是随纬度变化的系数。

(3) 月平均水蒸气压(e_a)：

$$e_{\text{a}} = 0.77(W - 1.2)/(1 + 0.006W)$$

式中，W (mm)是可降水水蒸气压(precipitable water vapour)。

(4) 空气动力学阻力：

$$r_{\text{H}} = 208/U_2$$

式中，U_2 是 2m 高处风速。

北部生态系统生产力模拟模型

Liu J, Chen J M, Cihlar J et al：利用遥感数据所进行的基于过程的北部生态系统生产力模拟。Remote Sensing of Environment, 1997, 62

(1) 叶水分势能(P_{lw})：

$$P_{\text{lw}} = 0.2/(W_{\text{S}}/C_{\text{S}})$$

式中，W_s 是土壤水分含量；C_s 是土壤水分容量。

(2) 日总光合作用(PSN)：

$$\text{PSN} = [\Delta CO_2 \times CC \times CM/(CC + CM)] \times l_{\text{la}} \times l_{\text{d}}$$

式中，CC 和 CM 是树冠气孔和叶肉的传导率(m · s^{-1})；l_{la} 是叶面积指数；l_d 白天时间长度(s)；ΔCO_2 是叶面和空气间的 CO_2 浓度梯度。

(3) 树冠吸收的有效光合作用辐射的比例(F_{PAR})：

$$F_{\text{PAR}} = (1 - \rho_1) - (1 - \rho_2)P(\theta_{\text{noon}}) \times \frac{\cos\theta_{\text{noon}} - (\pi/2 - \theta_{\text{noon}})\sin\theta_{\text{noon}}}{(\pi/2 - \theta_{\text{noon}})(1 - \sin\theta_{\text{noon}})}$$

式中，ρ_1 和 ρ_2 分别是树冠上部和下部的有效光合作用辐射 PAR 的反射率；$\cos\theta$ 表征了随着太阳天顶角的变化而导致的太阳光照的变化；P 是树冠间隙函数，有 $P(\theta) = P(0)(0.5\pi - \theta)$。

淤地坝系规划设计的计算模型

张汉雄，郭宝安：淤地坝系规划设计通用软件及其应用．水土保持通报，1997，17(2)

1．坝体断面及渗透计算

(1) 浸润线与渗透量的关系模型：

$$\frac{q}{q_k}=\frac{a_0}{m_2}\left(1+2.31\ \lg\frac{a_0+H_2}{a_0}\right)$$

式中，q 为单宽渗透流量；q_k 为坝体土料渗透系数；a_0 为浸润线逸出高度；m_2 和 H_2 分别为下游坝坡比和下游水深。

(2) 安全系数 K 模型：

$$K=\frac{0.1r_i\gamma_F\sum_1^n h_Z\cos\alpha_i\tan\varphi+CL_s}{0.1r_i\gamma_F\sum_1^n h_H\cos\alpha_i}$$

式中，C 为土料粘结力；L_s 为滑弧长度；n 为土条个数；α_i 为滑弧土条的切线角；φ 为坝体土料内摩擦角；h_H 和 h_Z 分别为滑动力和阻滑力的化引高度；γ_F 为土料的浮容重。

2．放水洞设计

放水孔径 d 模型：

$$d=0.438\sqrt{\frac{Q_0}{\sqrt{Z}}}$$

式中，Q_0 为单孔放水流量；Z 为放水孔高差。

3．溢洪道断面及消能设计

溢洪道设计流量模型：

$$Q=Q_m\left(1-\frac{W_1}{W_2}\right)$$

式中，Q 和 Q_m 分别为设计溢洪流量和洪峰流量；W_1 和 W_2 分别为坝的滞洪库容和设计洪水总量。

区域水资源供、需协调系数的计算

高彦春：区域水资源供、需协调评价的初步研究。地理学报，1997，52(2).

定义协调系数为反映区域水资源供需协调性大小的度量。设 n 为计算时间步长，以季为单位时 $n=12$，以月为单位时 $n=12$、以天为单位时 $n=365$；一定水平年的供水数值序列为 $X=(X_1,X_2,\cdots,X_n)$，一定水平年的需水数值序列为 $Y=(Y_1,Y_2,\cdots,Y_n)$，则供、需水数值序列各点相连成为两条曲线。如果 $X=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X_i$，$X_i'=\frac{X_i}{X}$；$Y=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}Y_i$，$Y_i'=\frac{Y_i}{Y}$。则，可得到两条新的曲线：$X'=(X_1',X_2',\cdots,X_n')$ 和 $Y'=(Y_1',Y_2',\cdots,Y_n')$。

定义供、需水曲线在第 i 时段的协调程度为：

$$K_i=\frac{\Delta\min+\rho\Delta\max}{\Delta(i)+\rho\Delta\max}$$

式中，ρ 为分辨系数，其作用在于提高 K_i 之间的显著性，$\rho\in(0,1)$；$\Delta\max=\max[\Delta(1),\Delta(2),\cdots,\Delta(n)]$；$\Delta(i)=|X_i'-Y_i'|$；$\Delta\min=\min[\Delta(1),\Delta(2),\cdots,\Delta(n)]$。

供、需水曲线的协调系数可表达为：

$$C_0=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}K_i$$

以上算法可以求出不同水资源与不同用水部门之间的协调系数。例如：

$$X_i=X_{1(i)}+X_{2(i)}+X_{3(i)}$$

式中，X_i 为第 i 时段区域总供水量；$X_{1(i)}$ 为第 i 时段河川径流量；$X_{2(i)}$ 为第 i 时段库塘蓄水量；$X_{3(i)}$ 为第 i 时段地下水可供水量；$i=1,2,\cdots,n$。

$$Y_i=Y_{1(i)}+Y_{2(i)}+Y_{3(i)}$$

式中，Y_i 为第 i 时段区域总需水量；$X_{1(i)}$ 为第 i 时段工业需水量；$X_{2(i)}$ 为第 i 时段农业需水量；$X_{3(i)}$ 为第 i 时段生活需水量。

现代荒漠化过程的演化模型

刘爱民，慈龙骏：现代荒漠化过程中人为影响的系统分析——以内蒙古自治区乌审旗现代荒漠化过程为例。自然资源学报，1997，12(3)

$$\frac{dx_i}{dt}=\alpha_i x_i\left[1-x_i-\sum\beta_{ij}\left(1-x_j\right)\right]-dx_i$$

式中，$x_i(i=1,2,\cdots,n)$ 表示各子系统的动态；$\beta_{ij}(i,j=1,2,\cdots,n)$ 表示系统的内部结构，即各子系统间的相互作用系数；$\alpha_i(i=1,2,\cdots,n)$ 表示外界对系统投入的控制参量。

经济基础研究方法

杨开忠：北京经济基础的基本特点与变化趋势　地理学报，1997，52(6)

(1) 基础部门——如果研究区域第 i 种经济活动区位商大于 1，则该部门为基础部门；反之，如果区位商小于 1 或等于 1，则不是基础部门。区位商的计算公式为：

$$LQ_i = \frac{E_i}{E} \cdot \left(\frac{N_i}{N}\right)^{-1}$$

式中，LQ_i 为研究区域第 i 种经济活动的区位商；E_i 为研究区域第 i 种经济活动水平；E 为研究区域全部经济活动水平；N_i 为整个区域体系第 i 种经济活动水平；N 为整个区域体系总的经济活动水平。

(2) 基础规模——基础部门中活动的绝对规模为：

$$S_i = \begin{cases} 0 & (LQ_i \leqslant 1) \\ \left(\frac{E_i}{E} - \frac{N_i}{N}\right)E = \left(1 - \frac{1}{LQ_i}\right)E_i & (LQ_i > 1) \end{cases}$$

式中，S_i 为研究区域第 i 部门的基础规模。

研究区域基础的总规模为：

$$\sum S_i = \sum\left(1 - \frac{1}{LQ_i}\right)E_i$$

(3) 基础率——基础规模与基础部门规模之比例被称为基础度：

$$P_i = \frac{S_i}{E_i}$$

空气污染模型

Hagner O, Rigina O：Monchegorsk 地区森林退化探测．Remote Sensing of Environment, 1998, 63

(1) 根据 Monchegorsk 地区的条件进行修正的高斯羽状扇形模型用于模拟长期平均大气污染，模型估计了长时期内排放源周围空气的平均污染浓度水平 (C)：

$$C(x,\theta) = \sum_s \sum_n \left[\frac{2Qf(\theta,s,n)P}{\sqrt{2\pi}\ \pi\sigma u_n x}\exp\left(-\frac{\left(H - \frac{v_g x}{u_n}\right)^2}{2\sigma^2}\right)\right]$$

式中，x 是到污染源距离；Q 是排放速率；$f(\theta,s,n)$ 分别是风向、大气稳定性和风速的频率矩阵；P 是排放区的数目；σ 是弥散参数；H 是有效烟羽高度；v_g 是重力沉降速度。

(2) SO_2 浓度与森林植被的光谱变化的统计关系：

$$Y = b_0 + b_1 \ln(SO_2)$$

式中，Y 是相关变量；b_0 是在零浓度水平时的偏移量，b_1 是反映 SO_2 浓度上升的影响的趋势项，SO_2 表示 SO_2 的浓度。

城市环境变化探测的 4 种算法

Ridd M K, Liu J：城市环境变化探测的 4 种算法的比较．Remote Sensing of Environment, 1998, 63

(1) chi square 转换方法：

chi square 转换公式可表示为：

$$Y = (X - M)^{\mathrm{T}}\Sigma^{-1}(X - M)$$

式中，Y 是变化图像中的像元的计数值(Mahalanobis 数)；X 是每个像元在两个日期间 6 个计数值的差别构成的矢量；M 是整个图像的每个波段的平均残差构成的矢量；T 表示矩阵的转置；Σ^{-1} 表示在两个日期之间 6 个波段的协方差矩阵的逆。

(2) 精确度的定义：

表示吻合度的 Kapa 系数(K)的公式为：

$$K = \frac{M\sum_{i=1}^{r} x_{ii} - \sum_{i=1}^{r} x_{i+}x_{+i}}{M^2 - \sum_{i=1}^{r} x_{i+}x_{+i}}$$

式中，r 是误差矩阵的行数；x_{ii} 是第 i 行第 i 列的观测值；x_{i+} 和 x_{+i} 分别是第 i 行和第 i 列的边界和；而 M 是观测值的总数。

$$K = \frac{P_o}{P_e}$$

式中，P_o 是观测到的吻合比例；P_e 是期望发生的吻合比例。

(3) 另一个类 kapp 系数可以更准确地补偿机会吻合的程度，可表示为：

$$K_1=\frac{P_0-1/n}{1-1/n}$$

式中，n 是类别的数目。

能量通量模型

Kustas W P, Zhan X, Schmugge T J. 组合光学遥感及微波遥感方法获取半干旱流域的能量通量图. Remote Sensing of Environment, 1998, 64

$$H=H_c+H_s=\rho c_p\frac{T_{ac}-T_a}{r_a}=$$

$$\rho c_p\frac{T_c-T_{ac}}{r_{ac}}+\rho c_p\frac{T_s-T_{ac}}{r_{as}}$$

$$LE=LE_c+LE_s=\frac{\rho c_p}{\gamma}\frac{e_{ac}-e_a}{r_a}=$$

$$\frac{\rho c_p}{\gamma}\frac{e_c-e_{ac}}{r_{ac}}+\frac{\rho c_p}{\gamma}\frac{e_s-e_{ac}}{r_{as}}$$

式中，下标 c 和 s 分别表示冠层和土壤表面；LE 和 H 分别是潜热和显热通量；T_a 和 e_a 是植物冠层上方空气的温度和水蒸气压；T_c 和 T_s 分别是叶片和土壤的温度；符号 r_a，r_{ac} 和 r_{as} 分别代表冠层上方的空气、叶边界层和土壤表面边界层对水蒸气和显热传输的空气动力学阻率；ρc_p 是空气的体积热容量；γ 是湿度计常数；e_{ac}、e_c 和 e_s 分别是冠层内、叶表面的空气及土壤表面的空气的水蒸气压；T_{ac} 是冠层空气的温度。

(1) 冠层和土壤表面的能量平衡方程为：

$$\frac{\rho c_p}{\gamma}\frac{e_c-e_{ac}}{r_{ac}}+\rho c_p\frac{T_c-T_{ac}}{r_a}=R_{nc}$$

$$\frac{\rho c_p}{\gamma}\frac{e_s-e_{ac}}{r_{as}}+\rho c_p\frac{T_s-T_{ac}}{r_{as}}=R_{ns}-G$$

式中，R_{nc} 和 R_{ns} 分别是植物冠层和土壤表面的净辐射；G 是土壤热通量。

一个将总的净辐射 R_n 分为 R_{nc} 和 R_{ns} 的简单方法为 Norman 等人提出的方法的修正形式，其考虑了不同太阳天顶角时净辐射的消光效应：

$$R_{ns}=R_n\exp\left(-\kappa I_{la}/\sqrt{2\cos\theta_s}\right)$$

$$R_{nc}=R_n\left[1-\exp\left(-\kappa I_{la}/\sqrt{2\cos\theta_s}\right)\right]$$

式中，$\kappa=0.6$ 适用于较大的太阳天顶角；I_{la} 是叶面积指数；θ_s 是太阳天顶角。

(2) 绿色植物叶片的潜热通量可根据分配到植物冠层上的净辐射加以估计：

$$LE_c=\frac{\rho c_p}{\gamma}\frac{e_c-e_{ac}}{r_{ac}}=\alpha_{PT}f_g\frac{\Delta}{\Delta-\gamma}R_{nc}$$

式中，α_{PT} 是 Prietley-Taylor 系数；f_g 是绿色叶片的比例；Δ 是温度饱和水蒸气压曲线的斜率。

(3) 土壤蒸发率 LE_s 可用下式估计：

$$LE_s=\frac{\rho c_p}{\gamma}\frac{h_r e\cdot(T_s)-e_s}{r_{ss}}$$

式中，h_r 是邻近土壤水分的空气的相对湿度；r_{ss} 是地表层对水蒸气传输的阻率。

绿色植被指数

Chen Z, Elvidge C D, Groeneveld D P. 利用 AVIRIS 数据监测干旱陆地植被的季节动态特征. Remote Sensing of Environment, 1998, 65

(1) 每个蔷薇科灌木群丛的原始反射系数利用 Blackman Window 低通滤波器进行光滑处理，滤波公式为：

$$w(n)=0.42-0.5\ \cos\frac{2\pi(n-1)}{N-1}+$$

$$0.08\ \cos\frac{4\pi(n-1)}{N-1}$$

式中，$n=1,2,\cdots,N$；N 是光滑处理中应用的邻近波段数。

(2) 1DL_DGVI 是利用岩石-土壤基线修正等到的一阶 DGVI，2DZ_DGVI 是没有进行岩石-土壤基线修正的二阶 DGVI，定义为：

$$\text{1DL_DGVI}=\sum_{\lambda_1}^{\lambda_n}\left|\rho'(\lambda_i)-\rho'(\lambda_1)\right|\Delta\lambda_i$$

$$\text{2DL_DGVI}=\sum_{\lambda_1}^{\lambda_n}\left|\rho''(\lambda_i)\right|\Delta\lambda_i$$

式中，i 和 λ_i 分别表示波段 i 的波数和中心波长，在本研究中利用了 $\lambda_1=626.9$ nm (band 25)和 $\lambda_n=792.9$ nm (Band 45)；ρ，ρ' 和 ρ'' 分别表示光滑反射系数，反射系数的一阶导数和二阶导数，求导的间隔是 $\Delta\lambda_i=(\lambda_{i+1}-\lambda_i)$。

(3) 为了排除负的导数值，1DL_DGVI 的定义修

上为：

$$\text{IDL_DGVI}=\sum_{\lambda_1}^{\lambda_n}\left|\rho'(\lambda_i)-\rho'(\lambda_1)\right|\Delta\lambda_i$$

仅当 $\rho'(\lambda_i)-\rho'(\lambda_1)\geqslant 0$

过火面积的组合判别模型

Paulo, Barbosa M, Pereira J M C et al：利用多时段低解析度卫星数据估计过火面积的组合判别标准. Remote Sensing of Environment, 1998, 65

(1) 为了估计过火与非过火类别之间的可区分性，一个简单的统计量(M)计算如下：

$$M=\left|\mu_1-\mu_2\right|/(\sigma_1+\sigma_2)$$

式中，μ_1 是过火类别信号的平均值；μ_2 是非过火类别信号的平均值；σ_1 是过火类别信号的标准偏差；σ_2 是非过火类别信号的标准偏差。

(2) 基于云层的反射系数及其亮度温度，在如下条件下一个像元被定义为有云：

$\rho(\text{Ch1})>44\%$ （云反射测试）且 $B_T(\text{Ch4})<293\text{K}$；或 $0.9<\rho(\text{Ch2})/\rho(\text{Ch1})<1.1$ （云的反射比测试）且 $B_T(\text{Ch4})<293\text{K}$ （云的热测试 1）；或 $B_T(\text{Ch4})<249\text{K}$ （云的热测试 2）。

半变量定义模型

Milne B T, Cohen W B：MODIS 确认、制图及建模应用的二进制连续土地覆盖变量的多尺度评估. Remote Sensing of Environment, 1999, 70

$$\gamma(h)=1/[2N(h)]\sum_{i=1}^{N(h)}(z_i-z_{i+h})^{\lambda}$$

式中，z_i 是位置 i 的变量；$N(h)$ 是分离距离为 h 的点对的数目；λ 为待定参数。

自组织神经网络模型

Fouilloux A, Iaquinta J：应用自组织神经网络方法根据卫星观测估计云的特性. Remote Sensing of Environment, 1998, 66

自组织神经网络含两个层(一个是输入层、另一个是输出层)，激活函数 σ（也称为传递函数)指导着像元的分类，根据 WTA(赢者通吃)原则，把每个输入矢量耦合为一个输出，传递函数则计算出输入矢量 X 与输出层的某个神经元的权重矢量 W 的相似度：

$$\left|\sigma(X,W)\right|=\min\left\{\frac{|X\cdot W|}{X^2},\frac{|X\cdot W|}{W^2}\right\}$$

$$\sigma(X,W)=\text{sgn}(X,W)\cdot\left|\sigma(X,W)\right|$$

式中，$\text{sgn}(X,W)=\begin{cases}-1 & (X\cdot W<0)\\ 1 & (\text{其他})\end{cases}$

辐射模型

刘建栋，傅抱璞，林振山等：冬小麦光合生产潜力数值模拟. 地理研究，1998，17(1)

(1) 逐日辐射的计算公式：

$$S=a+bQ_0s$$

$$D=a+bQ_0n$$

式中，S, D 分别为逐日直接太阳辐射日总量和散射辐射日总量；$Q_0=\frac{I_0\tau}{\pi r^2}(\omega_0\sin\psi\sin\delta+\cos\psi\cos\delta\cos\omega_0)$ 为天文辐射量，$\delta=0.006894-0.399512\cos(\theta)+0.072\sin(\theta)-0.006799\cos(2\theta)+0.000896\sin(2\theta)-0.002689\cos(3\theta)+0.001516\sin(3\theta)$，$I_0$ 为太阳常数；τ 为日长；r 为以日地平均距离为单位的日地距离，ψ 为地理纬度，$\omega_0=\arccos(-\tan\psi\tan\delta)$ 为日没时角，δ 为太阳赤纬，$\theta=2\pi(d_n-1)$ 为日角，d_n 为年的日序；s 为日照百分率；n 为云量；a，b 为系数。

(2) 辐射日变化的推算公式：

$$S(t)=\frac{C_s(t)}{C_s}\frac{\pi(\sin\psi\sin\delta+\cos\psi\cos\delta\cos\omega)}{\tau(\omega_0\sin\psi\sin\delta+\cos\psi\cos\delta\sin\omega_0)}S$$

$$D(t)=\frac{C_D(t)}{C_D}\frac{\pi(\sin\psi\sin\delta+\cos\psi\cos\delta\cos\omega)}{\tau(\omega_0\sin\psi\sin\delta+\cos\psi\cos\delta\sin\omega_0)}D$$

式中，$S(t)$，$D(t)$ 分别为直接辐射和散射辐射的日变化；C_s，C_D 分别为实际直接辐射、散射辐射日总量与天文辐射日总量之比；对一天中的各时刻为 $C_s(t)$，$C_D(t)$；ω 为太阳时角。

作物生理模型

刘建栋，傅抱璞，林振山等：冬小麦光合生产潜力数值模拟. 地理研究，1998，17(1)

1. 小麦发育阶段模型

$$V=\frac{dM}{dt}=a_0+a_1\exp[b(DL-DL_0)]+$$
$$a_2(T-T_{min})^{1+P}(T_{max}-T)^{1+Q}$$

式中，V 为发育速度；T 为日平均气温；DL 为日长；DL_0 为光照临界日长；T_{min}，T_{max} 分别为不同发育阶段发育速度的下限温度和上限温度；a_0，a_1，a_2，P，Q 为参数。

2. 冠层叶面光分布模型

(1) 直射光：

$$S(\alpha,\beta,h,A)=[Ss(i)/\sin h]|\cos\theta(\alpha,\beta,h,A)|$$

式中，$S(\alpha,\beta,h,A)$ 为叶面平均太阳直射光强；α 和 β 分别为叶片的倾角和方位角；h，A 为太阳高度角和方位角；$Ss(i)$ 为第 i 层水平面太阳直射光强度。

(2) 散射光：

$$D(\alpha)=D(i)\frac{1+\cos\alpha}{2}$$

式中，$D(\alpha)$ 为第 i 层叶面散射辐射强度；$D(i)$ 为第 i 层水平面散射光强度。

3. 光合作用与呼吸作用模型

(1) 单叶光合作用：

$$P_L(Q_{PAR})=P_{max}[1-\exp(-\chi Q_{PAR}/P_{max})]$$

式中，$P_L(Q_{PAR})$ 为叶面总光合速率；Q_{PAR} 为叶面光合有效辐射；χ 为光——光合作用曲线的初始斜率；P_{max} 为 $Q_{PAR}\to\infty$ 时 $P(Q_{PAR})$ 的渐进值。

(2) 群体光合速率：

$$P_z=\int_{-\omega_0}^{\omega_0}\int_0^L\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2}P_L(Q_{PAR},\alpha,\beta)\cdot p(\alpha,\beta)\cdot TF\,\mathrm{d}\alpha\mathrm{d}\beta\mathrm{d}L\mathrm{d}\omega$$

式中，Pz 为日总光合量；L 为叶面积深度；P_L 为单位叶面积光合速率；$p(\alpha,\beta)$ 为叶面积随倾角 α、方位角 β 的分布密度；TF 为根据三基点温度与光合作用的关系建立的隶属函数。

(3) 呼吸作用：

$$P_j=(Pz-R_{md}-R_{mg})r_R$$

式中，P_j 为群体日净光合量；R_{md}，R_{mg} 分别为日维持呼吸量和日生长呼吸量；r_R 为 CO_2 转化为碳水化合物的转换系数。

4. 物质分配模型

$$\begin{cases}GJWZ(i)=\sum_i^1[\Delta GJGZ(i)\cdot CVF-GWZ(i-1)\cdot SW]\\ YGZ(i)=\sum_i^1[\Delta YGZ(i)\cdot CVF-GWZ(i-1)\cdot SW]\\ SGZ(i)=\sum_i^1[\Delta SGZ(i)\cdot CVF-GWZ(i-1)\cdot SW]\end{cases}$$

式中，$GJWZ(i)$、$YGZ(i)$ 和 $SGZ(i)$ 分别为第 i 日根茎、叶、穗的干物重；Δ 表示日增量；CVF 为 CH_2O 转化为干物重的转换系数；$GWZ(i-1)$ 为第 $i-1$ 日的干物重，$GWZ(i)=GJWZ(i)+YGZ(i)+SGZ(i)$。

三维定位模型

尤红建，马景芝，刘彤等：基于GPS、姿态和激光测距的三维遥感直接对地定位. 遥感学报，1998，2(1)

$$\begin{cases}X_P=X_G+\left(S\cos\theta-\frac{S\sin\theta}{\sqrt{1-b^2}}b\right)\cos\omega\sin\alpha+\frac{S\sin\theta}{\sqrt{1-b^2}}\cos\kappa\\ Y_P=Y_G+\left(S\cos\theta-\frac{S\sin\theta}{\sqrt{1-b^2}}b\right)\sin\omega+\frac{S\sin\theta}{\sqrt{1-b^2}}\sin\kappa\\ Z_P=Z_G+\left(S\cos\theta-\frac{S\sin\theta}{\sqrt{1-b^2}}b\right)\cos\omega\cos\alpha\end{cases}$$

$$b=\cos\omega\sin\alpha\cos\kappa+\sin\kappa\cos\omega$$

式中，S 为 $G(x_G,y_G,z_G)$ 和 $P(x_P,y_P,z_P)$ 间的距离；α，ω 和 k 为 3 个姿态角。

法锥面方程

胡以华，魏庆农，章立民等：机载三维信息获取地面扫描轨迹分析. 遥感学报 1998，2(1)

$$x^2+(y\sin\theta+z\cos\theta)^2=(y\cos\theta-z\sin\theta)^2\tan^2\beta$$

流域水文对全球气候变化的响应模型

邓慧平，唐来华：沱江流域水文对全球气候变化的响应. 地理学报，1998，53(1)

(1) 流域水量平衡模型：

$$R=P-E_a-(W_t-W_{t-1})$$

$$GR=CR$$

$$SR=(1-C)R$$

$$DR=dG_t$$

$$G_t=G_{t-1}+CR-dG_t=\frac{G_{t-1}+CR}{1+d}$$

式中，P 为降雨量；E_a 为流域蒸散量；W_t 为月末流域蓄水量；W_{t-1} 为月初流域蓄水量；CR 为产水量 R 补给地下水的比例；SR 产水量 R 形成直接径流的部分；G_t 为该月地下水动态储量；G_{t-1} 为上月地下水动态储量；dG_t 为地下水动态储量中形成地下径流排出流域出口断面的部分；c 是平均径流来自地下水的比例系数；d 是表征地下水汇流速度的参数。

(2) 流域蒸发量：

$$E=E_p\frac{W}{W_0}$$

式中，W 为土壤有效水分；W_0 为蒸发不受土壤水分限制的临界值；E_r 为最大蒸发量(冠层阻力达到最小值时的蒸发量)。

(3) 流域蒸发力：

$$\lambda E_p=\frac{\Delta(R_n-G)}{\Delta+\Gamma(1+r_c/r_H)}+\frac{\beta\bar{\rho}C_p(e_a-e)/r_a}{\Delta+\Gamma(1+r_c/r_H)}$$

式中，R_n 为辐射平衡；G 为地下热通量；C_p 为定压比热；$\bar{\rho}$ 为空气密度；e_a 为气温下的饱和水汽压；e 是实际水汽压；Δ 为饱和水汽压在气温 T 时的斜率；Γ 为干湿表常数；r_a 为蒸发面至某一参考高度的空气阻力；r_c 为冠层表面阻力；β 是用涡度相关技术直接测定的通量与用梯度扩散理论计算的热通量和水汽通量之比。

相位解缠——泊松方程

向茂生，李树楷：一种基于梯度估值的 LMS 相位解缠方法．遥感学报，1998，2(2)

$$\phi_{i,j+1}+\phi_{i+1,j}+\phi_{i,j-1}+\phi_{i-1,j}-4\phi_{i,j}=$$
$$\hat{\psi}^x_{i,j}-\hat{\psi}^x_{i-1,j}+\hat{\psi}^y_{i,j}-\hat{\psi}^y_{i,j-1}$$

式中，ϕ 为测量到的相位值；ψ 为相位差场。

水稻作物气候产量预报模型

王人潮，王珂等：水稻单产遥感估测建模研究．遥感学报，1998，2(2)

(1) 干物质生产总量 D_{WT} 模型：

$$D_{WT}=\int_{播种期}^{成熟期}C_S\cdot s\cdot \mathrm{d}t$$

式中，C_S 为吸收的辐射转换为生物量的转换率；s 为每天冠层吸收的总光合辐射量。

(2) 作物产量 Y 模型：

$$Y=D_{WT}\cdot HI/0.86$$

式中，Y 为籽粒产量；HI 为收获指数；0.86 为籽粒水分换算系数。

人工神经网络(ANN)模型

冯国章，李佩成：人工神经网络结构对径流预报精度的影响分析．自然资源学报，1998，13(2)

设输入层有 n 个单元(神经元或节点组成)，x_i ($i=1,2,\cdots,n$)表示其输入亦即该层的输出；隐含层由 p 个单元组成；输出层由 q 个单元组成，y_k ($k=1,2,\cdots,q$)表示其输出；w^h_{ij} ($i=1,2,\cdots,n$；$j=1,2,\cdots,p$)表示从输入层到隐含层的连接权；w^0_{jk} ($j=1,2,\cdots,p$；$k=1,2,\cdots,q$)为隐含层到输出层的连接权。一般地，一个 ANN 若有 m 个隐含层，且每个隐含层均由 p 个单元组成，则可将其表示为：

$$z^h_j=f(s_j)=\frac{1}{1+e^{-s_j}}=\frac{1}{1+e^{-(\sum w^h_{ij}x_i-\theta_j)}}$$

式中，$f(s_j)$ 为生物神经元特性的 Sigmoid 函数，亦称响应函数或激活函数；s_j 是 j 单元的输入；当隐含层为 m 层时，$h=1,2,\cdots,m$。

当给定一个学习(输入)模式即径流序列 x_t ($t=1,2,\cdots,N$)，并给定 ANN 结构，即可用适当的算法对 ANN 进行训练，使其输出 $\hat{y}_t$ 与实际输出 y_t 之间的误差能量和(简称误差)：

$$E=\frac{1}{2}\sum_{t=1}^{N}(y_t-\hat{y}_t)^2$$

式中，如果 E 小于等于一限定值 E_0，即 $E\leqslant E_0$，则训练结束，相应的 ANN 及其参数便构成所求问题的 ANN 模型。

NOAA/AVHRR 数据的旱情监测模型

武晓波，阎守邕，田国良等：在 GIS 支持下用 NOAA/AVHRR 数据进行旱情监测．遥感学报，1998，2(4)

(1) 热惯量 P 模型：

$$P = \sqrt{\rho c \lambda}$$

式中，ρ 为密度；c 为比热容；λ 为热导率。

(2) 土壤热惯量 P 模型：

$$P = 2Q(1-A)/\Delta T$$

$$A = 0.52A_{ch1} + 0.474A_{ch2}$$

$$\Delta T = T_{ch42} - T_{ch41}$$

式中，Q 为总辐射；A_{ch1}，A_{ch2} 分别为 AVHRR 第 1，2 通道的反射率；A_{ch42}，A_{ch41} 分别为 AVHRR 第 4 通道午后和夜间的热红外辐射温度。

(3) 作物缺水指数(C_{WSI})模型：

$$C_{WSI} = 1 - \frac{E_d}{E_p}$$

式中，E_d，E_p 分别为日蒸散与日潜在蒸散。

土地覆被变化的统计模型

Wear D N, Turner M G, Naiman R J：城郊过渡区的土地覆被：水渍的意义。Ecological Applications, 1998，8(3)：619~630

(1)土地类型为 i 的地块的净收益(NB_i)可用下式表示：

$$NB_i = B(pr, X) - C(X)$$

式中，$B(pr, X)$ 是指由土地提供的商品和服务的价格 pr 与位置特性 X 所决定的收益；$C(X)$ 是指仅由土地的结构和位置特征所决定的成本。

(2) 土地覆被变化概率的罗杰特多项式模型：

$$P_{ij} = \frac{e^{X'\alpha_j}}{\sum_{s=1}^{k} e^{X'\alpha_s}} \qquad (j = 1, \cdots, k)$$

式中，P_{ij} 是指一个栅格单元的土地覆被从最初的类型 i 变为类型 j 的概率；k 是指土地覆被的类型数，对每个初始土地覆被类型 i，有 k 个土地覆被变化等式：$\alpha_j = \alpha_{j0} + D\alpha_{j1} + D^2\alpha_{j2}$，$D$ 是指该栅格沿道路到最近的、为其产品提供市场或其服务可被接受的城市；X 包括中途截取的(产品或服务)以及除距离之外的所有反映该点的结构和位置的变量；α 是系数。

(3) 沿城郊结合带的人口密度(PD)变化：

$$PD = K\left(1 - \frac{1}{1 + e^{\alpha + \beta_1 D_{TOT} + \beta_2 S}}\right)$$

并且该模型可用对数形式的普通最小二乘法来检验：

$$\lg \frac{Z}{1-Z} = \alpha + \beta_1 D_{TOT} + \beta_2 S$$

式中，$Z = PD/K$，K 是研究区内的农村地区的最大的人口密度；D_{TOT} 是指总的距离(沿道路到富兰克林的距离加上两倍至道路的最近距离)；S 是指该地的坡度；α，β_1 和 β_2 是系数。

(4) 非森林指数 (N_{FI})：

$$N_{FI} = \left| \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \left(\frac{Y_{i,j}}{(d_{i,j}+1)} \right) \right| \Big/ Y_{max}$$

式中，$Y_{i,j}$ 是一个二进制变量，当栅格(i,j)未被森林覆盖时，它等于 1，否则即为 0；$d_{i,j}$ 是指从栅格单元到由多个栅格组成的溪流的距离；Y_{max} 是括号中总的最大可能值；n 是指栅格数。

土壤限制蒸发信号的探测模型

Amano E, Salvucci G D：土壤限制蒸发的三个信号的探测和利用。Remote Sensing of Environment, 1999, 67

(1) Salvucci (1997) 模型预言阶段 2 的蒸发率(f)落在两个极限值之间，其依赖于阶段 1 的潜在蒸发率($\overline{e_p}$)的平均值和初始排泄率(K_0)的相对量级，其极限值相应于扩散决定通量($\overline{e_p} \gg K_0$；$f = f_{diff}$)，及重力决定通量($\overline{e_p} \ll K_0$；$f = f_{grav}$)，它们可表示为 $\overline{e_p}$ 和干燥时间(t_d)的显函数：

$$f_{diff} \cong \frac{2}{\pi} \overline{e_p} \left[\frac{t}{t_d} - \left(1 - \frac{\pi^2}{16}\right) \right]^{-1/2}$$

$$f_{grav} \cong \frac{8}{\pi^2} \overline{e_p} \left(\frac{t}{t_d} \right)^{-1}$$

(2) Priestley Taylor 模型表示为：

$$LE = \alpha \frac{s}{s+\gamma} (R_n - G)$$

式中，LE 是潜热通量；s 是饱和水蒸气压曲线在气温处的斜率；γ 是湿度计常数；α 是经验常数；R_n 是净辐射；G 是地面热通量。

模糊 ARTMAP 模型

Gopal S, Woodcock C E, Strahler A H：根据 1° AVHRR 数据库对全球土地覆盖的模糊神经网络分类 Remote Sensing of Environment, 1999, 67

(1) 模糊 ARTMAP 中的选择函数记为 T_j，对每一个输入 A 和 F_2 结点 j 定义如下：

$$T_j(A)=\frac{|A\wedge w_j|}{a|w_j|}$$

式中，模糊与算子 $\wedge$ 定义为：$(p\wedge q)_i\equiv\min(p_i,q_i)$；而对任意 M 维矢量 p 与 q，城市-街区范数 $|\cdot|$ 可定义为：$|p|\equiv\sum_i|p_i|$。

(2) 在任意给定时间，仅有一个 F_2 结点是活动的，我们说系统做了一个类别选择，令类别选择用 J 标志，则：

$$T_J=\max\{T_j:j=1,\cdots,N\}$$

选择系统中支配 F_1 活动性的矢量 x 的方程给为：

$$x=\begin{cases}A & (\text{当}F_2\text{为不活动时})\\ A\wedge w_J & (\text{当第}J\text{个}F_2\text{被选择时})\end{cases}$$

共振或复位操作：当匹配函数 $\frac{|A\wedge w_J|}{|A|}>\rho$，发生共振，$\rho$ 是警戒条件；当 $\frac{|A\wedge w_J|}{|A|}<\rho$ 时，发生不匹配复位。

(3) 学习：一旦搜索结束，权重因子根据下面的方程更新：

$$w_J^{(\text{new})}=\beta(A\wedge w_J^{(\text{old})})+(1-\beta)w_J^{(\text{old})}$$

式中，β 是参数。

反演模型的目标函数

Bicheron P, Leroy M：利用植被反射模型的反演在全球尺度上恢复生物物理学参数 Remote Sensing of Environment, 1999, 67

$$F=\sum_{j=1}^{n}\frac{(\rho_{\text{meas}}^j-\rho_{\text{mod}}^j)^2}{\rho_{\text{meas}}^j}+\sum_{i=1}^{m}\left[(x_i-x_{i,b})^2w_i\right]^2$$

式中，ρ_{meas} 和 ρ_{mod} 分别是反射系数的观测值和模型模拟值；n 是观察的次数；m 是独立参数的数目；$x_{i,b}$ 是数 i 的限制值，如果 $x_{i,\min}<x_i<x_{i,\max}$ 则 $w_i=0$，在其他条件下 $w_i=w$，w 取一个非常大的定值；利用原始的二向反射分布函数(ρ_0^j)与通过对一个参数微扰产生的二向反射分布函数(ρ_{pert}^j)可计算出伪目标函数 $F'=\sum_{j=1}^{n}\frac{(\rho_0^j-\rho_{\text{pert}}^j)^2}{\rho_0^j}$，$F'$ 称为灵敏度。

模糊似然度计算模型

Abuelgasim A, Ross W D, Gopal S et al：利用自适应模糊神经网络进行变化探测：海湾战争后的环境损害评估 Remote Sensing of Environment, 1999, 70

每个组别的模糊似然度可根据组中样本的平均值，最小值，最大值恢复得到，似然度反比于输入矢量 I 与类别平均值 W_{1j} 的距离，W_{1j} 的取值最小为 W_{2j}，最大为 W_{3j}，模糊组别似然度 F_j 可给为：

$$F_j=\sum\left[\frac{I_i-W_{2ji}}{W_{1ji}-W_{2ji}}\right]^++\left[\frac{W_{3ji}-I_i}{W_{3ji}-W_{1ji}}\right]^+$$

式中，$[x]^+=x$，对 $x>0$ 及 $[x]^+=0$ 对 $x<0$。

类别选择：对每个输入矢量 I 和结点处 j 的 F，组别选择 C_j 通过一个判别条件(DC)来控制。只有当最高的模糊似然度 F_J 超过次高的模糊似然度一个最小的模糊隶属水平，判别条件才作出选择。作为判别条件的最小模糊隶属水平可通过对一个专用的未知类别 n 的似然度的调整而加以设置，如 $F_n=V$，则：

$$C_J=\begin{cases}1 & (F_J>(DC)F_j)\\ 0 & (\text{其他})\end{cases}$$

式中，$DC>1$。

数字环境模型

高志强，刘纪远，庄大方：基于遥感和 GIS 的中国土地资源生态环境质量同人口分布的关系研究 遥感学报，1999，3(1)

(1) 用数字环境模型对中国土地资源生态环境质量评价模型：

$$I=\sum_{i=1}^{n}W_iC_i$$

式中，I 为指数值；W 为指标量值；C 为对应指标的权重；i 为某子系统的指标数。

(2) 中国土地资源生态环境质量同人口分布的相关系数 r 模型：

$$r = \frac{(1/n)\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\partial x \ \partial y}$$

$$\partial x = \sqrt{\sum x_i^2 / n - \overline{x^2}}$$

$$\partial y = \sqrt{\sum y_i^2 / n - \overline{y^2}}$$

式中，∂x 和 ∂y 分别为 x 和 y 的标准差。

自组织网络结构模型

孙丹峰，汲长远，林培：自组织网络在遥感土地覆盖分类中的应用研究．遥感学报，1999，3(2)

(1) 简单竞争学习：

1) 神经元的距离 D_i 模型：

$$D_i = \sum_{j=0}^{n-1}\left(X_j(t) - W_{ij}(t)\right)^2$$

式中，X 为输入向量；n 为向量 X 的维数。

2) 权向量系数 W_{ij} 修正模型：

$$W_{ij}(t+1) = W_{ij}(t) + a(t)[X_j(t) - W_{ij}(t)]$$

式中，$a(t)$ 为学习参数，$0 < a(t) < 1.0$；t 为第 t 次学习。

(2) 频率修正竞争学习——神经元的距离 D_i 模型：

$$D_i = \left\{\sum_{j=0}^{n-1}[X_j(t) - W_{ij}(t)]^2\right\} C_i(t)$$

式中，$C_i(t)$ 为神经元 I 到 t 时的累计激活次数。

(3) Desieno 学习——神经元距离 D_i 模型：

$$D_i = \left[\sum_{j=0}^{n-1}\left\|X_j(t) - W_{ij}(t)\right\|\right] - b_i(t)$$

$$b_i(t) = C\left[\frac{1}{m} - f_i(t)\right]$$

式中，$b_i(t)$ 为与频率 $f_i(t)$ 有关的修正系数；C 为衡量距离度量和激活频率之间的重要程度常数；m 为竞争层神经元个数。

(4) Kohonen 算法——神经元权向量系数 W_{ij} 模型：

$$W_{ij}(t+1) = W_{ij}(t) + a(t)h_{ii'}[\sigma(t)][X_j(t) - W_{ij}(t)]$$

$$h_{ii'} = \exp\left\{-\frac{(i-i')^2}{2[\sigma(t)]^2}\right\}$$

式中，$h_{ii'}$ 定义了一个胜者神经元 i' 的高斯邻域范围；$\sigma(t)$ 为 t 时刻高斯函数的方差。

(5) 模糊竞争学习——神经元权向量系数 W_{ij} 模型：

$$W_{ij}(t+1) = W_{ij}(t) + a(t)\ U_i^k\ \left[X_j(t) - W_{ij}(t)\right]$$

$$U_{ij}(t) = 1 - \frac{D_i(t)}{\max\limits_i D_i(t)}$$

式中，U_i 为模糊隶属度函数；k 为模糊化指数。

黄淮海地区冬小麦光温生产潜力模型

刘建栋，于强，傅抱璞：黄淮海地区冬小麦光温生产潜力数值模拟研究．自然资源学报，1999，14(2)

1. 辐射模型

由日照百分率即平均总云量可以推算出直接辐射日总量 S 及散射辐射日总量 D，一天中任一时刻 t 的 $S(t)$ 和 $D(t)$ 可表示为：

$$S(t) = \frac{\pi(\sin\psi\sin\delta + \cos\psi\cos\delta\cos\omega)}{\tau(\omega_0\sin\psi\sin\delta + \cos\psi\cos\delta\sin\omega_0)}\ S$$

$$D(t) = \frac{\pi(\sin\psi\sin\delta + \cos\psi\cos\delta\cos\omega)}{\tau(\omega_0\sin\psi\sin\delta + \cos\psi\cos\delta\sin\omega_0)}\ D$$

式中，ψ 为地理纬度；ω 为时角；$\omega_0 = \arccos(-\tan\psi\tan\delta)$，为日没时角；$\tau$ 为日长；δ 为太阳赤纬，由左大康 Fourier 分析结果进行计算。

2. 作物模型

(1) 发育阶段模式：

$$V = 2.3412\times10^{-0.3} + 1.2099\times10^{-0.3}e^{0.3(DL-DL_0)} + 1.62\times10^{-0.7}(T-T_{\min})^{(1.0+0.93)}(T_{\max}-T)^{(1.0+0.14)}$$

式中，V 为发育速度；T 为日平均气温；DL 为日长；DL_0 为光照临界日长；$T_{\min}$，$T_{\max}$ 为作物发育的下限和上限温度。V 的逐日累加值即为发育阶段 DVS，研究表明 DVS 值相对稳定，指标分别为：出苗 0.03，三叶 0.07，拔节 0.70，抽穗 0.88，开花 0.89，成熟 1.0。

(2) 冠层叶面光分布模式：

对于叶倾角相等、叶向均匀分布的叶层，直射光

消光系数$K(h)$可表示为：

$$Ksi(h)=\begin{cases}\cos\alpha & (\alpha\leqslant h)\\ \cos\alpha[1-2(\tan r-r)/\pi] & (h<\alpha<\pi/2)\\ 2\cot h/\pi & (\alpha=\pi/2)\end{cases}$$

式中，h为太阳高度角；α为叶倾角，$r=\arccos(\cot\alpha\tan h)$，此时平均直射光消光系数为$Ks(h)=\sum_{1}^{n}g_iKsi(h)$，$g_i$是第$i$种倾角叶面积密度。

叶面平均太阳直射光强度为：

$$S(\alpha,\beta,h,A)=\{S_0\exp[-Ks(h)I_{1a}(i-1)]/\sin h\}\times[\sin h\cos\alpha+\cos h\sin\alpha\cos(A-\beta)]$$

式中，A为太阳方位角；β为叶片方位角；S_0为水平面直接辐射；$I_{1a}(i-1)$是第$i-1$层叶面积深度，是叶从上方至第$i-1$层的累计叶面积指数值。

根据非水平面各向同性的散射辐射模式，第i层叶面散射辐射强度$D(\alpha)$为：

$$D(\alpha,\beta,h,A)=D_0\exp[-K_D(h)I_{1a}(i-1)]\frac{1+\cos\alpha}{2}$$

(3) 光合作用与呼吸作用模式：

单叶光合作用可表示为：

$$P_L(Q_{PAR})=P_{max}[1-\exp(-\chi Q_{PAR}/P_{max})]$$

式中，$P_L(Q_{PAR})$为叶面积总光合速率；Q_{PAR}为叶面光合有效辐射；χ为光-光合作用曲线的初始斜率；P_{max}是$Q_{PAR}\to\infty$时$P(Q_{PAR})$的渐进值。

将Q_{PAR}带入光合作用式中，同时考虑到温度的影响，然后积分，即得到日总光合量P_z：

$$P_Z=\int_{-\omega_0}^{\omega_0}\int_0^L\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2}P_L(Q_{PAR},\alpha,\beta)\cdot p(\alpha,\beta)\cdot TF\mathrm{d}\alpha\,\mathrm{d}\beta\,\mathrm{d}L\mathrm{d}\omega$$

式中，L为叶面积深度；$p(\alpha,\beta)$为叶面积随倾角α、方位角β的分布密度。

净光合速率P_n为总光合速率P_z与暗呼吸速率Rd之差。故群体日净光合量P_j为$P_j=P_n\times r_R$，其中，$r_R=0.68$，是由CO_2至碳水化合物的转换系数。

(4) 衰老模式：

当$DVS=0.0$时，干物质自然死亡率$SW=0.0$，$DVS=0.5$开始至成熟，$SW=0.001$，$DVS=0.0$和0.5之间的SW用线性内插得出。

(5) 物质分配模式：

日净光合物的分配系数随发育阶段DVS而变化，由此可以确定第i日叶干物重的日增量$\Delta YGZ(i)$，那么第i日叶干物重可由下式确定：

$$YGZ(i)=\sum_{i}^{1}\{\Delta YGZ(i)\cdot CVF-GWZ(i-1)\cdot SW\}$$

式中，$GWZ(i-1)$为第$i-1$日的干物重，同样可以确定出第i日的根茎、穗的干物重$GJWZ(i)$和$SGZ(i)$，$GWZ(i)=GJWZ(i)+YGZ(i)+SGZ(i)$；$CVF=0.75$，是由$CH_2O$到干物重的转换系数。

(6) 叶面积指数增长模式：

总叶面积与植株总干重之比为叶面积比率$B(\mathrm{cm^2\cdot g^{-1}})$，返青、拔节、抽穗、开花和乳熟阶段$B$值分别为：71.7，62.7，44.9，35.4，14.9，由叶面积比率和干物重即可换算出叶面积指数。

遥感图像分类模型

李强，王正志：遥感图像分类与后处理综合技术研究——基于约束满足神经网络方法. 遥感学报，1999，3(3)

1. 遥感图像的分类与后处理过程分析

(1) 初始分类过程：

类别先验概率$p(G_s=g_s|L_s=k)$模型：

$$p(G_s=g_s|L_s=k)=e^{-\left(\|g_s-\theta_k\|^2/(2\sigma_k^2)\right)-(1/2)\ln[(2\pi)^D\sigma_k^2]}$$

式中，θ_k和σ_k^2为第k类模式特征的均值向量和方差。

(2) 基于邻域类别的调整分类过程：

概率$p(L_s=k|L_{s+r},\forall r\in N_L^p)$模型：

$$p(L_s=k|L_{s+r},\forall r\in N_L^p)=\frac{e^{-E_2(L_s=k|L_{s+r},\forall r\in N_L^p)}}{Z_2}$$

$$E_2(L_s=k|L_{s+r},\forall r\in N_L^p)=-\sum_{r\in N_L^p}\beta(r)\delta(L_s-L_{s+r})$$

$$Z_2=\sum_{\forall L_s}e^{-E_2(L_2|L_{s+r},\forall r\in N_L^p)}$$

式中，N_L^p 为一个像元的 p 阶邻域偏移矢量；$p(L_s=k|L_{s+r},\forall r\in N_L^p)$ 为在已知邻域 $s+r$ 的类别情况下重新分配像元 s 的类别为 k 的概率；E_2 为能量函数；Z_2 为归一化因子；$\beta(r)>0$ 为衡量邻域类别对当前像元类别影响的重要程度的因子。

(3) 类别调整的竞争过程：

概率 $p(L_s=k|L_s=n)$ 模型：

$$p(L_s=k|L_s=n)=\frac{e^{-\alpha\bar{\delta}(k-n)}}{Z_n}$$

$$\bar{\delta}(l)=\begin{cases}0 & (l=0)\\ 1 & (l\neq 0)\end{cases}$$

式中，Z_n 为归一化因子；$p(L_s=k|L_s=n)$ 表示当前时刻像元 s 属于第 n 类，为其分配一个新类型号 k 的概率。

(4) 后验概率的公式表达：

后验概率 $p(L_s=k|G_s,L_{s+r},r\in N_L^p,L_s=n)$ 模型：

$$p(L_s=k|G_s,L_{s+r},r\in N_L^p,L_s=n)=\frac{e^{E(L_s=k|G_s,L_{s+r},r\in N_L^p,L_s=n)}}{Z}$$

式中，Z 为常数；E 为能量函数。

2. 基于约束满足神经网络的 RSIC& PIA 技术

网络的运转方程：

$$U_{i,j,k}(t)=\sum_{l,m,n}W_{i,j,k;l,m,n}O_{l,m,n}(t)+B_{i,j,k}$$

$$O_{i,j,k}(t+1)=\begin{cases}1 & (U_{i,j,k}(t)>0)\\ 0 & (U_{i,j,k}(t)<0)\\ O_{i,j,k}(t) & (U_{i,j,k}(t)=0)\end{cases}$$

式中，$B_{i,j,k}$ 为神经元的域值；$U_{i,j,k}(t)$ 为各神经元的输入；$O_{i,j,k}\in\{0,1\}$ 为输出；$W_{i,j,k,l,m,n}$ 为神经元 $C_{i,j,k}$ 到 $C_{l,m,n}$ 的连接权

大气微量成分总含量反演模型

魏合理：垂直气柱中大气微量成分总含量的反演.遥感学报，1999，3(3)

$$R_m(v)=\frac{V(v)}{V(v_0)}=\frac{\phi(v)\,\tau(v)}{\phi(v_0)\,\tau(v_0)}$$

式中，$\tau(v)$ 为待测气体吸收的大气透过率；$\phi(v)$ 为归一化仪器狭缝效应函数；v 为波数。

平均回波能量模型

姜景康，刘万检，刘锦丽：用机载雷达资料反演雨空间结构．遥感学报，1999，3(3)

$$\overline{P(r,\lambda)}=\left(C_\lambda/r^2\right)Z(r,\lambda)\exp\left[-0.46\int_0^r k(s,\lambda)ds\right]$$

$$\overline{P_s(r_s,\lambda)}=\left(C_{s\lambda}/r_s^2\right)\sigma^0(\lambda)\exp\left[-0.46\int_0^{r_s}k(s,\lambda)ds\right]$$

式中，$\overline{P(r,\lambda)}$ 为雷达收到的有效距离为 r 处的散射元的平均回波能量；$\overline{P_s(r_s,\lambda)}$ 为雷达收到的表面 r_s 处的平均回波能量；$Z(r,\lambda)$ 为反射率因子；C_λ 为雷达常数；λ 为波长；k 为比衰减因子。

环境质量评价模型

李岩，黄文房：绿洲综合评价信息系统的设计、建模和应用．地理研究，1999，18(3)

(1) 单项环境指标得分：

$$Eq_{ij}=I_{ijk}\ W_{ik}$$

式中，E_{qij} 为单项环境指标得分；I_{ijk} 为第 j 个小区，第 i 项指标的第 k 级记分；W_{ik} 为第 i 项指标的第 k 级权重系数。

(2) 各类指标的环境质量得分：

$$EQ_i=\sum_{i=1}^{n}Eq_{ij}$$

(3) 各小区环境质量总体评价：

$$EQ_j=\sum_{j=1}^{n}Eq_{ij}$$

(4) 产业结构评价与优化模型：

$$\text{结构效益}=\sum_{i=1}^{n}\frac{e_i}{E}\cdot P_i-P$$

式中，E 和 P 为第一、二、三次产业的总产值和相应

产业的平均资金税率；e_i 和 P_i 为三次产业中第 i 个行业的产值和平均资金税率。

车辆导航与监控中 GPS/GIS 实时定位配准误差分析模型

陆锋，崔伟宏：车辆导航与监控中 GPS/GIS 实时定位配准误差分析．遥感学报，1999，3(4)

1．大地直角坐标转换误差

(1) 布尔莎模型转换公式：

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + (1+k)\begin{bmatrix} 1 & \varepsilon_Z & -\varepsilon_Y \\ -\varepsilon_Z & 1 & \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y & -\varepsilon_X & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}$$

式中，X_1，Y_1，Z_1 和 X_2，Y_2，Z_2 为同一点在不同坐标系中的大地直角坐标；ΔX，ΔY，ΔZ 为两个坐标系的坐标原点平移量；k 为无量纲的尺度因子；ε_X，ε_Y，ε_Z 为坐标轴旋转角。

(2) 舍入误差对大地坐标的影响模型：

$$\Delta B'' = -\sin L \cdot \varepsilon_X + \cos L \cdot \varepsilon_Y$$
$$\Delta L'' = \tan B \cdot \cos L \cdot \varepsilon_X + \tan B \cdot \sin L \cdot \varepsilon_Y - \varepsilon_Z$$

2．投影变换误差

各分量误差均值模型：

$$E_{\text{average}} = \frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n} p_i q_i$$
$$E'_{\text{average}} = \frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n} p'_i q'_i$$

式中，$p_0, p_1, \cdots$ 为 GPS 单点一次定位值直接经仿射变换所得到的平面直角坐标点；p'_0、$p'_1, \cdots$ 为各点经实时位置差分、严格大地坐标转换及投影变换后的位置点；p_0q_0、p_1q_1，$\overline{p'_0q'_0}$，$\overline{p'_1q'_1}, \cdots$ 为各误差矢量垂线分量。

(3) 误差矢量分量的模的数学期望 $E(|p_a q|)$ 模型：

$$E(|p_a q|) = \frac{4\int_0^{\frac{\pi}{2}} e\cos\theta \, d\theta}{2\pi}$$

式中，p_a 为测量点的真实坐标；θ 为 $p'_a p_a$ 与 $p_{a-1}p_a$ 路段的夹角

日总光合作用量模型

Choudhury B J：一个根据卫星数据估计日总光合作用量模型的适用性评估。Remote Sensing of Environment, 2000, 71

(1) 冠层光合作用的瞬时数据 A_c（μ mol $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$）为：

$$A_c = 0.044 \times 43.35Q/(43.35 + 0.044Q)$$

式中，Q 是吸收的辐射。

(2) 叶片光合作用率 A_l：

$$A_l = A_m\{(1+\eta) - [(1+\eta)^2 - 4\theta\eta]^{0.5}\}/(2\theta)$$

$$\eta = \varepsilon aF_1 A_m$$

式中，A_m 是光合作用的最大速率；ε 是量子效率；a 是单片叶子的 PAR 吸收率；θ 是曲率因子；F_1 是叶片上的辐射。

浅草生态系统中辐射利用效率的时间过程模型

Nouvellon Y, Seen D L, Rambal S et al：浅草生态系统中的辐射利用效率的时间过程——初级生产力的遥感结果．Remote Sensing of Environment, 2000, 71

总光合作用率：

$$P_g = \text{PAR} f_{\text{APAR}} \varepsilon_{g\max} f_1(\psi_f) f_2(T) f_3(a)$$

式中，f_{APAR} 是 PAR 吸收比例；$\varepsilon_{g\max}$ 是最大能量转化效率；$f_1(\psi_1)$，$f_2(T)$ 和 $f_3(a)$ 分别表示不理想的温度、水分胁迫及叶片老化的抑制效应。

$$f_1(\psi_f) = \frac{1.64r_{s\min} + r_m + 1.39r_a}{1.64r_{sc} + r_m + 1.39r_a}$$

$$r_{sc} = r_{s\min}\left[1 + \left(\frac{\psi_f}{\psi_{1/2}}\right)^n\right]$$

式中，$r_{s\min}$，r_{sc}，r_m 和 r_a 分别是冠层对水蒸气的气孔阻力的最小值和当前值，及叶肉和冠层边界层对水蒸气的阻力的最小值和当前值；ψ_f 和 $\psi_{1/2}$ 分别是在当前气孔闭合度及 50%闭合度时的叶水分势；n 是一个经验性的形状参数。

$$f_2(T) = \begin{cases} 0 & (T \leqslant T_{\min}) \\ 1 - \dfrac{T_{\text{opt}} - T}{T_{\text{opt}} - T_{\min}} & (T_{\min} < T < T_{\text{opt}}) \\ 1 & (T \geqslant T_{\text{opt}}) \end{cases}$$

式中，T_{opt} 和 T_{min} 分别是 C_4 草类总光合作用率最佳及最小时相应的温度。

$$f_3(a)=\begin{cases}0 & (a>50)\\ 1-\dfrac{a-15}{35} & (15<a\leqslant 50)\\ 1 & (a\leqslant 15)\end{cases}$$

经验性土壤水分估计模型

Bindlish R, Barros A P：利用 IEM 测量的 SAR 数据对土壤水分的多频率反演。Remote Sensing of Environment, 2000, 71

(1) 模型将不同极化方向的后向散射系数的比值与土壤的体积水分含量(m_v)和表面粗糙高度(s)联系起来：

$$p=\frac{\sigma^{\circ}_{HH}}{\sigma^{\circ}_{VV}}=\left[1-\left(\frac{2m_v}{\pi}\right)^{1/3\Gamma_0}\exp(-ks)\right]^2$$

$$q=\frac{\sigma^{\circ}_{HV}}{\sigma^{\circ}_{VV}}=0.23\sqrt{\Gamma_0}\left[1-\exp(-ks)\right]$$

式中，Γ_0 是表面在天底角方向上的 Fresnel 反射率，表示为 $\Gamma_0=\left|\dfrac{1-\sqrt{\varepsilon}}{1+\sqrt{\varepsilon}}\right|^2$；$k$ 是波数；ε 是复介电常数；σ° 是在 HH(水平发射；水平接收)；VV(垂直发射，垂直接收)；HV(水平发射，垂直接收)极化方向上的后向散射系数。

(2) 对后向散射系数(σ_{tatal})的一个校正形式为：

$$\sigma'_{total}=\sigma_{tatal}-\Delta\sigma_{veg}\frac{C_{vw}}{C_{vw\,ref}}$$

式中，$\Delta\sigma_{veg}$ 是校正项的最大值；C_{vw} 是植被水分含量；C_{vwref} 是参照值。

探测森林雨水存储的数学模型

Jong J, Klaassen W, Ballast A：利用 ERS 串联任务 SAR 探测森林与水存储。Remote Sensing of Environment, 2000, 72

(1) 雨水拦截模型将冠层处理为一个桶，其被降水所注满，再通过散发而倒空，当达到 S_{max} 时，桶将发生溢出，假设一个闭合的冠层拦截了所有的降水，则存储量的变化 S 表示为：

$$\frac{\partial S}{\partial t}=P-R-E$$

式中，P 是降水量；E 是湿润冠层的蒸发量；R 是从冠层产生的径流，径流只有在 S 超过 S_{max} 时发生，S_{max} 可表达为 $S_{max}=0.2I_{la}$，I_{la} 是单面叶面积指数；$E=\left(\dfrac{S}{S_{max}}\right)^{2/3}E_p$，$E$ 为蒸发率，E_p 是潜在蒸发率。

(2) 每个植被覆盖单元的有效介电常数的 Debye-Cole 共轭分散模型的基本形式为：

$$\varepsilon=\varepsilon_r+(v_s+v_f)\varepsilon_f+v_b\varepsilon_b$$

式中，ε 是介电常数；v 是比例；下标 r, f 和 b 分别表示相对不重要的、归因于冠层单元的固体物质的，单元中的自由水的，以及单元中的束缚水的剩余成分；v_s 是存储雨水的体积比例；$v_f=M_g(0.55M_g-0.076)$，M_g 是重力测量的水含量；$v_b=4.64M_g^2(1+7.36M_g^2)$，$M_g$ 的含义同前；$\varepsilon_r=1.7-0.74M_g+6.16M_g^2$，$M_g$ 的含义同前；$r_w=\sqrt{r_d^2+r_d\dfrac{S}{I_{la}}}$，$r_w$ 和 r_d 分别是湿润的和干燥的针叶的半径。

流域土壤水分指数

Quesney A, Hegarat-Mascle S L, Taconet O et al：根据 ERS/SAR 数据估计流域土壤水分指数。Remote Sensing of Environment, 2000, 72

(1) 用于修正 σ_0 测量值，考虑了土壤贡献的修正项 corr_σ：

$$\text{corr}_\sigma=\frac{-20\ \tau}{\ln 10}-10\cdot\lg\left(1-\frac{\sigma_{veg}}{\sigma_{mes}}\right)$$

式中，σ_{mes} 是野外测量到小麦的雷达信号；σ_{veg} 是从植被层计算的雷达后向散射；τ 是植被层的光学厚度。

(2) 小麦目标区的土壤水分估计：

$$\sigma_0(\text{dB})=-14.19+0.28\ W_v(\%)$$

式中，土壤的体积水分值 W_v 相应于在小麦试验田的实际测量值的平均；σ_0 表示在 Orgeval 所有小麦地的雷达信号。

叶面积指数的经验估计公式

Qi J, Kerr Y H, Moran M S et al：利用遥感数据和 BRDF 模型估计半干旱地区的叶面积指数。Remote Sensing of Environment, 2000, 73

$$I_{la}=ax^3+bx^2+cx+d$$

$$I_{la}=a+bx^c$$

$$I_{la} = -1/2a\ln(1-x)$$

式中，x 是从遥感数据获取的植被指数或反射系数，系数 a，b，c 和 d 是经验参数，随着植被类型不同而变化。

玉米叶片中叶绿素浓度的估计模型

Daughtry C S T, Walthall C L, Kim M S et al：从叶片和冠层的反射系数估计玉米叶片中叶绿素浓度. Remote Sensing of Environment, 2000, 74

（1）反射指数中叶绿素吸收的修正形式(I_{MCAR})：

$$I_{MCAR} = \left[(R_{700} - R_{600}) - 0.2(R_{700} - R_{550})\right](R_{700}/R_{670})$$

式中，R_λ 是在波长 λ 处的反射系数。

（2）优化土壤调整植被指数(I_{OSAV})：

$$I_{OSAV} = \frac{(1+0.16)(R_{801} - R_{670})}{R_{801} + R_{670} + 0.16}$$

土壤物理特性的遥感和人工神经网络估计模型

Chang D H, Islam S：利用遥感和人工神经网络估计土壤物理特性. Remote Sensing of Environment, 2000, 74

（1）对一个给定的深度 L，土壤表层水分与时间的关系为：

$$\theta(t) = \left\{\left[\frac{\theta_{sat}^{2b+4}L}{(2b+3)K_{sat}}\right]^{1/(2b+3)}\right\} t^{-1/(2b+3)}$$

式中，θ_{sat}，K_{sat} 和 b 分别是饱和水分含量、饱和水力学导度和纹理参数。

（2）多层前向反馈神经网络的使用：

前向反馈神经网络(FFNN)由三层神经元构成，隐含层中神经元 i 的输出为：

$$\varphi_i(k) = f_1 \sum_{m=1}^{P} (\omega_m^i \xi_m^k)$$

式中，$f_1(\mathrm{net}_i) = 1/(1+e^{-\mathrm{net}i})$。

输出层的结果为：

$$y(k) = f_2 \sum_{i=1}^{I} W_i \varphi_i(k)$$

式中，$f_2(\mathrm{net}_j) = r_{ound}(\mathrm{net}_j)$，$\omega$ 是一个 $I \times P$ 阶矩阵，表示隐含层中的权；W 是一个 $1 \times I$ 阶矩阵，表示输出层中的权。

维纳和申农对“信息系统”的数学描述

孙九林：广泛开展资源信息科学研究和应用. 自然资源学报, 2000, 15(1)

$$H = -K \sum_{i=1}^{n} P_i \lg P_i \text{bit/每个信息}$$

式中，H 为每个消息的平均信息量；K 为玻尔兹曼常数；P_i 为先验概率；bit 是以 2 为底的对数时信息的单位。

目标物与环境的表观温度模型

唐新斋，张仁华，苏红波等：比辐射率封闭法测定技术及误差分析. 遥感学报, 2000, 4(1)

$$T^4 = \varepsilon_d T_d^4 + (1-\varepsilon_d)\varepsilon_{ee} T_e^4$$

式中，ε_d 表示目标物的比辐射率；ε_{ee} 表示箱体的等效比辐射率；T_d 为目标物的真实温度；T_e 为真实温度。

机载三维遥感的动态 GPS 数据处理模型

尤红建，李树楷：适用于机载三维遥感的动态 GPS 定位技术及其数据处理. 遥感学报, 2000, 4(1)

（1）脉冲时刻的三维位置(X,Y,Z)的内插模型：

$$\begin{cases} X(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t + a_3 t \\ Y(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t + b_3 t \\ Z(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t + c_3 t \end{cases}$$

（2）标基准转换模型：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{BJ-54} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1+\Delta k & \varepsilon_Z & -\varepsilon_Y \\ -\varepsilon_Z & 1+\Delta k & \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y & -\varepsilon_X & 1+\Delta k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{WGS-84}$$

式中，ΔX，ΔY 和 ΔZ 为 3 个原点坐标平移参数；ε_X，ε_Y 和 ε_Z 为 3 个坐标旋转参数；Δk 为尺度比参数。

（3）坐标投影变换模型：

$$
\begin{cases}
x = s + \dfrac{\lambda^2 N}{2}\sin\varphi\cos\varphi + \\
\dfrac{\lambda^4 N}{24}\sin\varphi\cos^3\varphi(5-\tan^2\varphi+9\eta^2+4\eta^4)+ \\
\dfrac{\lambda^6 N}{720}\sin\varphi\cos^5\varphi(61-58\tan^2\varphi+\tan^4\varphi) \\
y = \lambda N\cos\varphi + \dfrac{\lambda^3}{6}N\cos^3\varphi(1-\tan^2\varphi+\eta^2)+ \\
\dfrac{\lambda^5}{120}N\cos^5\varphi(5-18\tan^2\varphi+ \\
\tan^4\varphi+14\eta^2-58\tan^2\varphi\cdot\eta^2)
\end{cases}
$$

式中，$N=\dfrac{a}{\sqrt{1-e'^2\sin^2\varphi}}$；$s=\dfrac{N\lambda''\cos\varphi}{\rho''}$；$\eta^2=e'^2\cos^2\varphi$；$\lambda=l-l_0$；$a=6\,378\,245.0$；$e'^2=0.006\,738\,525\,414\,684$。

(4) 光学中心位置模型：

$$
\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{Sensor}} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{Antenna}} - \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}
$$

式中，$A_1=\cos\varphi\cos\kappa-\sin\varphi\sin\omega\sin\kappa$；$A_2=\cos\varphi\sin\kappa-\sin\varphi\sin\omega\cos\kappa$；$A_3=-\sin\varphi\cos\omega$；$B_1=\cos\omega\sin\kappa$；$B_2=\cos\omega\cos\kappa$；$B_3=-\sin\omega$；$C_1=\sin\varphi\cos\kappa-\cos\varphi\sin\omega\sin\kappa$；$C_3=-\cos\varphi\cos\omega$；$C_2=-\sin\varphi\cos\kappa+\cos\varphi\sin\omega\cos\kappa$；俯仰$\varphi$测滚$\omega$航向$\kappa$由姿态测量装置(惯性导航系统 INS)来同步测量，为式中的 3 个姿态参数。

星载散射计反演海面风场的场方式反演算法

林明森：一种修正的星载散射计反演海面风场的场方式反演算法，遥感学报，2000，4(1)

(1) 场方式反演——风场矢量模型：

$$
\begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{bmatrix} = F\tilde{X}
$$

式中，$\tilde{u}=\begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \cdots & u_{nn} \end{bmatrix}$；$\tilde{v}=\begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ v_{n1} & v_{n2} & \cdots & v_{nn} \end{bmatrix}$；$\tilde{X}$ 为 $4N-2$ 个边界点的压力边界值及 N_C-N_D 个涡度、散度系数；F 是已知的一个满秩矩阵系数。

(2) 分步投影算法模型：

$$
v^{n+1}=v^{*}-\frac{\Delta t}{\Delta x}\delta_y P^{n+1}
$$

$$
v^{*}=v^{n}-\Delta t G^{n}
$$

$$
u^{n+1}=u^{*}-\frac{\Delta t}{\Delta x}\delta_x P^{n+1}
$$

$$
\frac{1}{\Delta x}\left(\frac{\delta_x P^{n+1}}{\Delta x}\bigg|_r-\frac{\delta_x P^{n+1}}{\Delta x}\bigg|_l\right)+\frac{1}{\Delta y}\left(\frac{\delta_y P^{n+1}}{\Delta y}-\frac{\delta_y P^{n+1}}{\Delta y}\right)=-\left[\frac{1}{\Delta x}\left(F_r^n-F_l^n\right)+\frac{1}{\Delta y}\left(G_a^n-G_b^n\right)\right]
$$

二氧化碳倍增条件下的遥感-光合作物产量响应模型

张佳华，王长耀，符淙斌：CO_2倍增下遥感-光合作物产量响应模型的研究与应用，遥感学报，2000，4(1)

(1) 模型构建：

$$
\mathrm{GPP}^c=\sum_{i=1}^{m}Pn_i^c\cdot\mathrm{CPAP}_i
$$

$$
\mathrm{NPP}^c=\mathrm{GPP}^c(I-R_d)
$$

$$
Y=f(\xi)\cdot\mathrm{NPP}^c
$$

式中，i=1，⋯，m，表示作物各生长期；$\mathrm{CPAP}=(I_{la1}+I_{la2})(T_2-T_1)/2$ 为光合同化势，I_{la1} 和 I_{la2} 分别为 T_1 和 T_2 的叶面积指数；Pn_i^c 为 CO_2 倍增下作物第 i 生育期的平均光合速率；GPP^c、NPP^c 分别为作物总光合同化量和总光合同化量与呼吸消耗的差；R_d、$f(\xi)$ 分别为呼吸消耗的比率和干物质积累效率。

(2) 响应模型：

$$
P_n^c=P_n(1-\Delta P)
$$

式中，P 为光合速率。

数学形态学的基本运算

张青年，秦建新：面状分布地物群识别与概括的数学形态学方法．地理研究，2000，19(1)

(1) 膨胀模型：

$$X \oplus B = \{x+b : x \in X, b \in B\} = \bigcup_{b \in B} X[b]$$

(2) 腐蚀模型：

$$X \ominus B = \{x : x+b \in X, b \in B\} = \bigcup_{b \in B} X[b]$$

(3) 断开模型：$X \cdot B=(X \ominus B) \oplus B$

(4) 闭合模型：$X \cdot B=(X \oplus B) \ominus B$

(5) 击中模型：$X \ni (B_1,B_2)=(X \ominus B_1) \cap (X^C \ominus B_1)$。

(6) 薄化模型：$X \odot B=X-(X \ni B)$

(7) 厚化模型：$X \odot B=X \cup (X \ni B)$

式中，X 为待处理的图像；B 为结构元。

多维参数同时反演的遗传算法

王沉泉，金亚秋：陆地表面粗糙度和土壤湿度多维参数同时反演的遗传算法．遥感学报，2000，4(2)

(1) 粗糙地面的双尺度散射模型：

$$\sigma_{pq}(\theta)=\sigma_{pq}^{KA}(\theta)+\left\langle\sigma_{pq}^{SPA}(\theta)\right\rangle \quad p,q=v,h$$

式中，$\sigma_{pq}^{KA}(\theta)$ 和 $\left\langle\sigma_{pq}^{SPA}(\theta)\right\rangle$ 分别为同极化后向反射系数的 KA 解和 SPA 解。

(2) 遗传算法反演参数——代价函数模型：

$$c=\sum_{\theta}\left|\sigma_{hh}^{T}(\theta)-\sigma_{hh}^{R}(\theta)\right|^2 \qquad (\text{dB})$$

基于遗传算法与人工神经网络的玉米估产评价函数

李哲，张军涛：基于遗传算法与人工神经网络相结合的玉米估产研究．自然资源学报，2000，15(3)

$$f=1/\sum_{i=1}^{n} e_i^2 \tag{1}$$

选择方式不采用比例选择方式，而使用亲代度量 S 决定群体中每个个体被选种的概率，群体中的个体以式(2)所示的概率作为亲代染色体。

$$P_2=P_1 \ S$$
$$P_3=P_2 \ S \tag{2}$$
$$\vdots$$

式中，P_1，P_2，P_3，… 分别表示评价函数最优、次优、第三……的个体概率。

3 层 BP 网络模型：

$$b_i=f\left(\sum_{h=1}^{n} a_h V_{hi}+\theta_i\right) \tag{3}$$

式中，$i=1,2,\cdots,p$；a_h 为输入层节点($h=1,2,\cdots,n$)；V_{hi} 为输入层到隐含层的连接权重；θ_i 为隐含层单元的阈值。对于 a_h，V_{hi} 和 θ_i，它们的初值是按概率 $e^{-|r|}$ 得到的随机数。激活函数 Sigmoid 函数：

$$f(\chi)=1/(1+e^{-\chi}) \tag{4}$$

然后根据式(3)和式(4)计算输出层节点的激活值：

$$C_j=f\left(\sum_{i=1}^{p} W_{ij} b_i+\gamma_j\right) \tag{5}$$

式中，$j=1,2,\cdots,q$；W_{ij} 为隐含层到输出层的连接权重；γ_j 为输出层的阈值；W_{ij} 和 γ_j 也是按概率 $e^{-|\gamma|}$ 确定的随机数。

根据式(6)计算输出层的一般化误差：

$$d_j=C_j(1-C_j)(C_j^k-C_j) \tag{6}$$

式中，C_j^k 为输出层单元 j 的期望输出。

最后计算隐含单元相对于每个 d_j 的误差：

$$e_i=b_i(1-b_i)\sum_{j=1}^{q} W_{ij} d_j \tag{7}$$

控制面积及图斑实际面积的计算模型

张穗，庄大方，胡文岩：国家基本资源与环境遥感数据库集成中的面积汇总技术．遥感学报，2000，4(4)

(1) 行政县 j 的国土面积模型：

$$A_j=\sum_{i=1}^{n} C_{ij}\frac{T_i}{C_i}$$

式中，C_{ij} 为行政县 j 在图幅 i 中所占部分的量算面积；T_i 和 C_i 分别为图幅 i 的理论面积和量算面积

(2) 土地资源图斑实际面积 P_k 的计算模型：

$$P_k = C_k \frac{A_j}{C_j}$$

式中，C_k 为图斑 k 的量算面积；A_j 和 C_j 分别为 k 所在县(旗) j 的实际国土面积和量算面积。

(3) 应扣除的线状地物面积(L_A)模型：

$$L_A = \sum_{i=1}^{n} L_i B_i$$

式中，L_i 和 B_i 分别为图斑内 n 条线状地物中第 i 条的长度和宽度。

(4) TM 细小地物扣除量模型：

$$S_{TM} = \sum_{i=1}^{m} R_i \frac{S_i}{S} L$$

式中，S 为量算面积，S_i 为 A 落在土地利用区划图块 i 中部分的量算面积，L 为 A 的经过线状地物扣除后的实际面积，R_i 为测量到的组合数据。

载波相位相对定轨及模糊度解算模型

胡国荣，欧吉坤，崔伟宏：星载 GPS 载波相位相对定轨方法研究. 遥感学报，2000，4(4)

(1) 线性化双差观测模型：

$$\nabla\Delta\Phi = A^{jk}x + \lambda_1 \nabla\Delta N + \nabla\Delta\varepsilon_\Phi$$

式中，λ_1 为 L1 载波相位波长；$x = \left(\delta X_f, \delta Y_f, \delta Z_f\right)^T$ 为低轨卫星三维轨道位置改正数。

低轨卫星三维轨道位置改正数的数学模型：

$$A^{jk} = \begin{bmatrix} \dfrac{X^j - X_{f0}}{\left(\rho_f^j\right)_0} - \dfrac{X^k - X_{f0}}{\left(\rho_f^k\right)_0} \\ \dfrac{Y^j - Y_{f0}}{\left(\rho_f^j\right)_0} - \dfrac{Y^k - Y_{f0}}{\left(\rho_f^k\right)_0} \\ \dfrac{Z^j - Z_{f0}}{\left(\rho_f^j\right)_0} - \dfrac{Z^k - Z_{f0}}{\left(\rho_f^k\right)_0} \end{bmatrix}^T$$

$$(\rho_f^j)_0 = \left[(X^j - X_{f0})^2 + (Y^j - Y_{f0})^2 + (Z^j - Z_{f0})^2\right]^{1/2}$$

$$(\rho_f^k)_0 = \left[(X^k - X_{f0})^2 + (Y^k - Y_{f0})^2 + (Z^k - Z_{f0})^2\right]^{1/2}$$

式中，$\left(X^j, Y^j, Z^j\right)$ 和 $\left(X^k, Y^k, Z^k\right)$ 分别为第(j,k)颗 GPS 卫星的三维轨道位置；$\nabla\Delta N = \nabla\Delta N_{fg}^{jk}$ 为双差模糊度；$\nabla\Delta\varepsilon_\Phi$ 包括双插载波相位观测值误差和线性展开误差。

(2) 模糊度闭合差检验判断条件：

$$\left|\nabla\Delta N_{g1 \cdot g2} - (\nabla\Delta N_{fg1} - \nabla\Delta N_{fg2})\right| \leq \varepsilon$$

沉积物采样与粒度分析模型

汪亚平，高抒，贾建军：胶州湾及邻近海域沉积物分布特征和运移趋势. 地理学报，2000，55(4)

平均粒径 μ 、分选系数 δ 、偏态 S_k 的模型分别为：

$$\mu = \sum_{l}^{n} P_i x_i$$

$$\delta = \left[\sum_{l}^{n} P_i (x_i - \mu)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$S_k = \left[\sum_{l}^{n} P_i (x_i - \mu)^3\right]^{\frac{1}{3}}$$

式中，P_i 为样品中粒径为 x_i (以 Φ 制表示)的组分出现的频率；n 为该样品所有粒径组分的数目。

土壤水分的实际变异函数

王军，傅伯杰，邱扬等：黄土丘陵小流域土壤水分的时空变异特征——半变异函数. 地理学报，2000，55(4)

(1) 球状模型：

$$\begin{cases} r(h) = C_0 + C^{\frac{3}{2}\frac{h}{a} - \frac{1}{2}\frac{h^3}{a^3}} & (h \leq a) \\ r(h) = C_0 + C & (h \geq a) \end{cases}$$

(2) 指数模型：

$$r(h) = C_0 + C\left(1 - e^{-\frac{h}{a}}\right)$$

式中，C_0 为块金值(nugget)；$C_0 + C$ 为基台值(sill)；a 为相关距离(correlation length)；h 为距离。

流域物质与水系及产沙间非线性关系模型

金德生，陈浩，郭庆伍：流域物质与水系及产沙间非线性关系实验研究. 地理学报，2000，55(4)

(1) 细物质流域产沙过程特征模型：

$$Q_{s-1}=8.586\exp(-0.003T)$$

(2) 粗物质流域产沙过程特征：

$$Q_{s-4}=31.183\exp(-0.001T)$$

(3) 较粗物质流域产沙过程特征：

$$Q_{s-6}=67.757\exp(-0.004T)$$

上述三式中 Q_{s-1}、Q_{s-4} 和 Q_{s-6} 为产沙量，以 $0.1\text{kg}\cdot\text{min}^{-1}$ 计；T 为时间，以 min 计。

(4) 水系分形维数模型：

$$D=\ln K_1/\ln K_2$$

式中，D 为分数维值；K_1 和 K_2 为河长定律系数。

利用 SIR-C 数据的土壤水分估计模型

Narayanan R M, Hirsave P P：利用 SIR-C 数据的土壤水分估计模型——美国 New Hampshire 的案例研究．Remote Sensing of Environment, 2001, 75

(1) 雷达散射理论模型：

Kirchhoff 模型适用于其尺度大于入射波长的表面，其后向散射系数 $\sigma_{pp}^0(\theta)$ 表示为镜向(或相干)成分 $\sigma_{pp}^0(\theta)$ 和漫射(或非相干)成分 $\sigma_{pp}^0(\theta)$ 之和：

$$\sigma_{pp}^0(\theta)=\sigma_{ppc}^0(\theta)+\sigma_{ppn}^0(\theta)$$

式中，p 表示极化方向(垂直或水平)。

为了简化结果，引入两个简化模型：

a：物理光学模型(POM)：对小坡度及中等或小 RMS 高度的表面进行标量近似而得到的 Kirchhoff 模型。

b：几何光学模型(GOM)：对 RMS 高度较大的表面进行静止相近似而得到的 Kirchhoff 模型。

在 POM 中，非相干散射系数的表达式为：

$$\sigma_{ppn}^0=2k^2\cos^2\theta\Gamma_p(\theta)\exp[-(2ks\cos\theta)^2]\times\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(4k^2s^2\cos^2\theta)^n}{n!}\int_0^{\infty}\rho^n(\xi)J_0(2k\xi\sin\theta)\xi d\xi$$

式中，s 是表面的 RMS 高度；θ 是入射角；k 是波数；$\Gamma(\theta)$ 是 Fresnel 反射系数。

对存在指数自相关函数的表面，可表达为：

$$\sigma_{ppn}^0=2k^2\cos^2\theta\Gamma_p(\theta)\exp[-(2ks\cos\theta)^2]S$$

式中，$S=\sum_{n=1}^{\infty}\dfrac{(4k^2s^2\cos^2\theta)^n}{n!l(2k\sin\theta)^3}\left[\left(\dfrac{n}{l2k\sin\theta}\right)^2+1\right]^{-3/2}$；

$$\Gamma_h(\theta)=\left[\frac{\sqrt{\varepsilon_r}\cos\theta-\cos\left(\arcsin\dfrac{\sin\theta}{\sqrt{\varepsilon_r}}\right)}{\sqrt{\varepsilon_r}\cos\theta+\cos\left(\arcsin\dfrac{\sin\theta}{\sqrt{\varepsilon_r}}\right)}\right]^2;$$

$$\Gamma_v(\theta)=\left[\frac{\cos\theta-\sqrt{\varepsilon_r}\cos\left(\arcsin\dfrac{\sin\theta}{\sqrt{\varepsilon_r}}\right)}{\cos\theta+\sqrt{\varepsilon_r}\cos\left(\arcsin\dfrac{\sin\theta}{\sqrt{\varepsilon_r}}\right)}\right]^2;$$

l 是表面的相关长度。

在 GOM 中，粗糙表面的后向散射系数的相干成分小到可忽略，而非相干成分起决定作用。对相对粗糙的表面的后向散射系数的非相干成分的表达式为：

$$\sigma_{ppn}^0=\Gamma_p(0)\exp\left(\frac{-\tan^2\theta}{2m^2}\right)/2m^2\cos^4\theta$$

式中，m 是 RMS 坡度；θ 是入射角；$\Gamma(0)$ 是当法向入射时的 Fresnel 反射，公式为 $\Gamma(0)=\left|\dfrac{\sqrt{\varepsilon_r}-1}{\sqrt{\varepsilon_r}+1}\right|^2$

(2) 经验模型：

根据对特性得到完整了解的表面进行全面的野外测量，联合极化后向散射系数可给为：

$$\sigma_{vv}^0=g\sqrt{q}\cos^3\theta[\Gamma_v(\theta\theta)+\Gamma_h(\theta\theta)]$$

$$\sigma_{hh}^0=\frac{g\cos^3\theta}{\sqrt{q}}[\Gamma_v(\theta\theta)+\Gamma_h(\theta\theta)]$$

式中，$g=0.7\{1-\exp[-0.65(ks)^{1.8}]\}$；

$$q=\left[1-\left(\frac{2\theta}{\pi}\right)^{1/3\Gamma(0)}\right]^2$$

离散傅氏变换

Moody A, Johnson D M：利用离散傅氏变换从 AVHRR 得到陆地表面生物气候学特性．Remote Sensing of Environment, 2001, 75

$$y_k=\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}c_k e^{-i2\pi k/N}$$

式中，N 是时间序列的样本数量；i 是虚数符号；c_k 是第 k 个样本值。

利用 Euler 方程，DFT 公式可分解为三角函数形式：

$$e^i\theta = \cos\theta + i\sin\theta$$

式中，θ 是角度项。

将 Euler 方程代入 DFT 表达式，则：

$$y_n = a_0 + a_1\cos\frac{2\pi n}{N} + b_1\sin\frac{2\pi n}{N} +$$

$$a_2\cos\frac{4\pi n}{N} + b_2\sin\frac{4\pi n}{N} + \cdots +$$

$$a_k\cos\frac{2k\pi n}{N} + b_k\sin\frac{2k\pi n}{N}$$

式中，a_0 是平均值；a_1 和 b_1 是一阶三角函数系数，依次类推。

后向散射模型参数化的半经验模型

Bindlish R, Barros A P：基于雷达土壤水分估计的植被后向散射模型的参数化 Remote Sensing of Environment, 2001, 76

对给定入射角 θ，后向散射系数 σ^0 在水分-云模型中的一般表达形式为：

$$\sigma^0 = \sigma^0_{\text{canopy}} + \sigma^0_{\text{canopy-soil}} + \tau^2\sigma^0_{\text{soil}}$$

式中，σ^0_{canopy} 表示植被冠层的散射；$\sigma^0_{\text{canopy+soil}}$ 表示植被冠层与土壤在下面的相互作用项，即多重散射效应；σ^0_{soil} 表示从土壤层的散射；τ^2 表示双向植被透射率。

在水分-云模型中，植被土壤相互作用被忽略，

$$\sigma^0 = \sigma^0_{\text{veg}} + \tau^2\sigma^0_{\text{soil}}$$

式中，$\tau^2 = \exp(-2Bm_v\sec\theta)$；$m_v$ 是植被水分含量；$\sigma^0_{\text{veg}} = Am_v\cos(1-\tau^2)$；$A$ 和 B 是决定于冠层类型的参数

环境无害化技术评价模型

连函，曹炜华：环境无害化技术信息共享系统建设 资源科学，2001，23(1)

$$B = AR = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \cdots & a_n \end{bmatrix}\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} b_1 & b_2 & \cdots & b_n \end{bmatrix}$$

式中，A 为权向量；$a_i \in [0,1]$，且 $\sum_{i=1}^{n} a_i = 1$，a_i 为第 i 评价指标中所获得的总权重；R 为由 n 个评价指标构成的总评价矩阵；r_{ij} 为第 i 技术第 j 指标的隶属度；B 为综合评判指标矩阵；b_j 为第 j 技术的综合评价指标。

图形重建算法

关雄试，徐继生，马淑英等：电离层 CT 数据采集和图像重建 遥感学报，2001，5(1)

(1) 差分多普勒相位模型：

$$\Phi = \psi + \Phi_0 = C_D\int_p N_e(r,\theta)\mathrm{d}l = C_D\int_{r_s}^{r_e}\frac{N_e(r,\theta)}{\cos\alpha}\mathrm{d}r$$

式中，C_D 为常数，对于 NNSS 卫星，$C_D = 1.612\times10^{-5}$ rad·m^2；N_e 是沿传播路径 p 上任意一点的电子密度；r 和 θ 式射线上任一点的极坐标，由于目前均采用极轨卫星开展 CIT 研究，因此 r 和 θ 可取为地心距离和纬度；α 是传播路径上任意一点的天顶角；r_e 和 r_s 分别是地球半径和卫星轨道半径，积分项即为该路径的斜 TEC；Ψ 是台站实际记录到的相对差分多普勒相位；Φ_0 是相位积分常数，它是由相位数据纪录的特点(即纪录的相位值总在 0~2π 之间)所引入的一个未知量。

(2) 差分多普勒频率：

$$\Omega = \omega_s\cdot C_D\left[\int_{r_e}^{r_s} N_e\frac{\partial}{\partial\theta_s}\left(\frac{1}{\cos\alpha}\right)\mathrm{d}r + \int_{r_e}^{r_s}\frac{1}{\cos\alpha}\frac{\partial N_e}{\partial\theta}\frac{\partial\theta}{\partial\theta_s}\mathrm{d}r\right]$$

式中，θ_s 为卫星的地理纬度；$\omega_s = \mathrm{d}\theta_s/\mathrm{d}t$ 为卫星运动的角速度，对于 NNSS 卫星，ω_s 可以看做常数。

(3) 网格中任意一点的电子密度值：

$$N_e^{(k)}(r,\theta) = \sum_{i=0}^{1}\sum_{j=0}^{1} a_{ij}^{(k)} r^i\theta^j$$

式中，k 为网格的指标；a_{ij} 为差值多项式的系数。

(4) 矩阵方程：

$$Y_D = L_D X + E_D$$

式中，Y_D 为各台站记录到的所有可用射线的差分多普勒频率数据组成的列向量；L_D 是相应的投影矩阵，列向量 E_D 代表离散化引入的误差；X 是反演区域离

散化网格点的电子密度值所组成的待求列向量。

(5) 初值分布沿纬向平均的加权 IRI (intermataional reference ionosphere)模型：

$$x_0(r,\theta)=c\cdot N_{eIRI}(r)$$

式中，$N_{eIRI}(r)$式反演区域内沿纬向平均 IRI 模型的电子密度分布；权系数c是常数其经验值在 0.1~2.0 之间。

(6) 第n次迭代的迭代误差模型：

$$e^{(n)}=\left[\frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i-y_i^{(n)})^2}{\sum_{i=1}^{N}y_i^2}\right]^{\frac{1}{2}}$$

式中，y_i是向量Y_D的元素，代表实际的差分多普勒频率值；$y_i^{(n)}$是第n次迭代产生的差分多普勒频率值；N是参与反演的射线总数。

牧草产量气象预报模式

黄敬峰，王秀珍，王人潮等：天然草地牧草产量遥感综合监测预测模型研究. 遥感学报，2001，5(1)

(1) 农作物产量气象预报模型：

$$y=y_t+y_w+y_e$$

式中，y为实际产量；y_t为趋势产量，常表示成时间的函数；y_w为气象产量；y_e代表随机因素引起的随机产量，常忽略不计。

(2) 第一阶段的预报方程：

$$y=69.75+2.89R_1-1.81H_3+0.57R_{4\sim6}+2.37H_5$$

$$(r=0.84,\quad n=21)$$

式中，R_1为 1 月份的降水量；H_3为 3 月份的相对湿度；R为 4~6 月份的降水量；H_5为 5 月的相对湿度。

(3) 第二阶段的预报方程：

$$y=-767.04+0.97R_{4\sim8}-0.54R_{11\sim3}+37.11E_{4\sim8}+19.87T_8$$

$$(r=0.89,\quad n=21)$$

式中，$R_{4\sim8}$为 4~8 月份的降水量；$R_{11\sim3}$为前年 11 月到当年 3 月份的降水量；$E_{4\sim8}$为 4~8 月份的平均绝对湿度；T_8为 8 月平均气温。

(4) 第三阶段的逐步回归方程：

$$y=-600.07-2.89H_{11\sim3}+11.95T_{7\sim8}+0.44R_{4\sim10}+46.03E_{4\sim10}+10.61T_{9\sim10}$$

$$(r=0.95,\quad n=21)$$

式中，$H_{11\sim3}$为前年 11 月到今年 3 月平均相对湿度；$T_{7\sim8}$为 7~8 月的平均气温；$R_{4\sim10}$为 4~10 月降水量；$E_{4\sim10}$为 4~10 月份的平均绝对湿度；$T_{9\sim10}$为 9~10 月平均气温。

连续植被组分温度的遗传算法反演模型

庄家礼，陈良富，徐希孺：用连续植被的组分温度. 遥感学报，2001，5(1)

(1) 连续植被热辐射方向性模型：

$$L_\lambda(\theta)=\varepsilon_{ve}(\theta)B_\lambda(T_v)+\varepsilon_{se}(\theta)B_\lambda(T_s)$$

式中，$L_\lambda(\theta)$是在λ波段、θ视角方向上混合像元的辐射亮度值；$\varepsilon_{ve}(\theta)$和$\varepsilon_{se}(\theta)$分别为植被冠层和土壤表面的有效比辐射率；T_v和T_s分别为植被冠层和土壤温度；$B_\lambda(T)$为波段λ上，温度为T时的宽波段普朗克黑体辐射公式。

(2) 组分温度的遗传算法：

$$F=-\sum_{\theta}\left[L_\lambda(\theta)-L_\lambda^t(\theta)\right]^2$$

合成孔径雷达图像的近岸海面风场反演模型

杨劲松，黄韦艮，周长宝等：合成孔径雷达图像的近岸海面风场反演。遥感学报 2001，5(1)

(1) 海面风场反演方法：

1) 风向的反演方法——SAR 图像低波数谱的计算方法如下：

$$Y_{l,m}=\sum_{j=1}^{N}\sum_{k=1}^{N}X_{j,k}e^{-2\pi i(jl+km)/N}$$

式中，Y为图像低波数谱；X为图像灰度值;$l,m=1,2,\cdots,N$。

2) 风速的反演方法——CMOD-IFR2 模式

$$\sigma_{VV}^0=10\lg\{10^{a+b\sqrt{u_{10}}}[1+b_1\cos(\phi-\psi)+b_2\cos2(\phi-\psi)]\}$$

式中，VV 为垂直极化；u_{10}为海面以上 10m 高处的风速；ϕ和ψ分别为风向和雷达天线方位角，a,b,b_1和b_2与雷达波速入射角ϕ的关系分别为：

$a=c_1+c_2P_1+c_3P_2+c_4p_3$, $b=c_5+c_6P_1+c_7P_2$,
$b_1=c_8+c_9V_1+c_{10}Q_1+c_{11}Q_1V_1+c_{12}Q_2+c_{13}Q_2V_1$,
$b_2=c_{14}+c_{15}Q_1+c_{16}Q_2+(c_{17}+c_{18}Q_1+c_{19}Q_2)V_1+$
$(c_{20}+c_{21}Q_1+c_{22}Q_2)V_2+(c_{23}+c_{24}Q_1+c_{25}Q_2)V_3$,
$P_1=x$, $P_2=(3x^2-1)/2$, $P_3=(5x^2-3)/2$,
$x=(\phi-36)/19$, $Q_1=y$, $Q_2=2y^2-1$, $V_1=(2u_{10}-24)/22$
$V_2=2V_1^2-1$, $V_3=(2V_2-1)V_1$, $y=(2\phi-76)/40$,
$c\to c_{25}$ 为常数。

(2) 风场反演结果——SAM 图的辐射定标模型：

$$\sigma^0=10\lg[(X^2+A_1)/A_2]+10\lg(\sin\phi)$$

式中，A_1 为偏移量；A_2 为增益；ϕ 可表达为 $\phi=\arccos\frac{h^2-R^2+2rh}{2rR}$，$h$ 为卫星轨道高度，r 为地球半径，R 为斜距。

碳库估算模型

王绍强，周成虎：土地覆被变化对陆地碳循环的影响——以黄河三角洲河口地区为例．遥感学报，2001，5(2)

(1) Kappa 系数 K 模型：

$$K=\frac{M\sum_{i=1}^{r}X_{ii}-\sum_{i=1}^{r}X_{i+}X_{+i}}{M^2-\sum_{i=1}^{r}X_{i+}X_{+i}}$$

式中，r 为误差矩阵的行数；X_{ii} 为 i 行 i 列上的值(即每种类型正确分类的检测样本数目)；X_{i+} 和 X_{+i} 分别为 i 行 i 列上值的总合(即每种类型选取的检测样本总数和实际被分为该种类型被检测样本的总数)；M 为所有检测样本数的总和。

(2) 黄河三角洲河口地区的植被碳库模型：

$$V_i=S_i\ B_i\times0.5$$

式中，i 为土壤覆被植被类型；V_i 为第 i 种植被类型的植被碳储量；S_i 为第 i 种植被类型面积；B_i 为第 i 种植被类型的生物量密度。

(3) 黄河三角洲河口地区的土壤碳库模型：

$$C_j=S_j\ H_j\ O_j\ W_j\times0.58$$

式中，j 为土壤类型；C_j 为第 j 种土壤类型的碳储量；S_j 为第 j 种土壤类型面积；H_j 为第 j 种土壤类型的平均厚度；O_j 为第 j 种土壤类型的平均有机质含量；W_j 为第 j 种土壤类型的平均容重。

遥感技术监测船舶航速的相关模型

王红梅，潘广东，王超等：利用遥感技术监测船舶航速的方法研究．遥感学报 2001，5(2)

(1) 利用波高谱提取航速 U 的模型：

$$U=\frac{\sqrt{gK_j}}{2\pi\left|u_{mj}\cos\alpha+v_{mj}\sin\alpha\right|}$$

式中，$j=1$ 或 2(即波高谱上点 1 或 2)；g 为重力加速度；K 为波数。

(2) 从横波波长计算航速 V 的模型：

$$V=\sqrt{\frac{\lambda g}{2\pi}}$$

式中，λ 为横波在航迹线上的波长。

(3) 提取高波谱的系数 $R_{\rm SAR}^2$ 模型：

$$R_{\rm SAR}^2=\mu^2k_a^2+m^2k_r^2$$
$$\mu=\frac{R}{V_{\rm P}}\sqrt{gk}\cos\theta_i$$
$$m=\frac{4\cos\theta_i}{1\pm\sin^2\theta_i}$$

式中，k_a 为方位波数；k_r 为距离波数；R 为 SAR 平台到海洋表面的距离；$V_{\rm P}$ 为 SAR 平台的速度；θ_i 为入射角。

(4) 衰减规律模型：

$$H_S=H\exp\left(-0.11\frac{S}{L}\right)$$

式中，H_S 为向岸传播 S 距离的衰减波高；H 为船侧船尾迹波高；S 为船舷到计算点的距离；L 为船尾迹波长。

组合 GPS/GLONASS 观测值随机模型

胡国荣，崔伟宏：组合 GPS/GLONASS 精密定位的观测值随机模型．遥感学报，2001，5(2)

观测值随机模型：

$$\sigma^2=a_0+a_1e^{-h/h_0}$$

式中，σ 为精度；a_0、a_1 和 h_0 分别为根据实际观测值分析得出的指数函数系数；h 为 GPS/GLONASS 卫星高度角。

城市热力空间分析模型

周红妹：基于遥感和GIS的城市热场分布规律研究. 地理学报，2001，56(2)

(1) 热力空间分析模型为：

$$F = f(N,S,T,W)$$

(2) 普朗克公式为：

$$T_B = \frac{C_2 V}{\ln(C_1 V^3 / E + 1)}$$

(3) 土地利用和TM图像融合模型：

$$W_{jk} = S_{jk} \cup T_{jk}$$

式中，W_{jk} 为土地利用和TM图像融合结果；S_{jk} 为土地利用栅格图像；T_{jk} 为TM图像；j 为介质类别；k 为象元号

(4) 不同亮温的几何区域中下垫面不同种类介质与总面积比例计算公式：

$$Y_{ij} = \sum_{k=1}^{n} W_{jk} \Big/ \sum_{k=1}^{m} N_{ik}$$

式中，Y_{ij} 为下垫面不同种类介质占该亮温段mask区总面积比例；N_{ik} 为NOAA亮温图像；i 为某级亮温；j 为介质类别；n 为某亮温mask区中 j 类介质的像元个数；m 为某亮温mask区中的像元个数。

(5) 隶属关系数学模型：

$$Z_p = \sum_{i=1}^{m} W_i Q_{ip}$$

式中，Z_p 表示第 p 点的最终复合结果等级；W_i 表示第 i 个要素的权重；Q_{ip} 表示第 i 个要素在 p 点的类别的专家打分值；m 表示影响因子的个数。

水环境保护与经济发展决策模型

王西琴：水环境保护与经济发展决策模型的研究. 自然资源学报，2001，16(3)

1. 宏观经济模型

$$\sum_{j=1}^{n} X_{ij} + Y_i = X_i \qquad (i = 1,\cdots,n);$$

$$X_i + H_i = S_i; \quad X_j - G_j = T_j; \quad T_j = S_i$$

式中，$\sum_{j=1}^{n} X_{ij}$ 为 i 部门提供的供各部门使用的中间产出，H_i 为第 i 个部门处理污水所用资金；S_i 为第 i 个部门在扣除污水处理费用后提供的总产出；X_j 为第 j 个生产部门污水处理资金投入；T_j 为第 j 部门在增加污水处理资金后的总投入。

2. 需水模型

$$Q_{vi} = (q_{gi} + q_{(bg)i}) \pm Q_{gi} \pm Q_{mi}$$

$$Q_{vi} \geqslant \lambda \ Q_{\omega i}$$

$$Q_{vi} \geqslant Q_{ni}(p) \qquad (p \geqslant p_0)$$

式中，Q_{yi} 为 i 小段河道最小环境需水量；q_{gi} 为 i 小段河道上游来的地下水；$q_{(bg)i}$ 为支流进入为 i 小段的地下水；Q_{gi} 为河段本身进入河道的地下水；Q_{mi} 表示除河道基流外；为满足一定的河道环境功能要求所必须具有的水量。$q_{gi} + q_{(bg)i} \pm Q_{gi}$ 为河段的地下水来水总量；也就是该河段河道的基流量；λ 为河流稀释系数；$Q_{\omega i}$ 为 i 小段合理的污水排放总量。$Q_{ni}(p)$ 为设定水文年(多年平均、枯水年、平水年)指定保证率下 i 小段的河道流量。计算处所有断面的 $Q_{vi}(i = 1,2,\cdots,n, i$ 为断面数)后，即可确定整个河流(河段)的最小环境需水量。

3. 水环境容量模型

$$E_0 = (C_s - C_0)Q_0$$

式中，E_0 为功能区段首容量值；Q_0，C_0 和 C_s 分别为来水水量($m^3 \cdot s^{-1}$)，来水浓度($mg \cdot L^{-1}$)及该功能区段水质标准($mg \cdot L^{-1}$)。则第 i 个排污口处的环境容量为 $E_i = C(1 + f(x_i - x_{i-1}))Q_{i+1} - Q_i C_s$，$Q_{i-1} = Q_i + q_i$，$Q_i$ 为第 i 个断面河流干流中水量，q_i 为第 i 个断面河流中污水量，C为混合浓度($mg \cdot L^{-1}$)，$f(x)$ 为一函数，C_s 为本功能区段的水质标准，则该功能区段的总环境容量(E)可表达为 $E = CQ - Q_s C_s + \sum_{i=1}^{n}[C(1 + f(x_i - x_{i-1})]Q_{i+1} - Q_i C_s$，$Q$ 为河流来水水量与污水量之和，Q_s 为符合该河流一定功能并达到其水质标准的河流总水量。

4. 产业结构优化模型

$$\max Z = \sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}(Q_{ij} / q_{ij})(1 - p_{ij} \ c_{ij})$$

式中，j 为研究区分区；i 为产业结构；Q 为用水量($10^8 m^3 \cdot a^{-1}$)；q 为亿元产出需水量[$10^4 m^3 \cdot (10^8$ 元$)^{-1}$]；

p为亿元产出废水量[$10^4m^3 \cdot (10^8$元$)^{-1}$]；c为废水处理费用10^8元$\cdot(10^4m^3)^{-1}$

在不考虑分区和面源污染的情况下，其表达式为：

$$\max Z=(Q_2/q_2)(1-p_2\times c_2)+(Q_3/q_3)(1-p_3\times c_3)$$

式中，Q_2为工业总用水量；q_2为工业亿元产出需水量；p_2为工业亿元产出废水量；c_2为工业废水处理费用；Q_3为第三产业总用水量；q_3为第为工业三产业亿元产出需水量；p_3为第三产业亿元产出废水量，c_3为第三产业废水处理费用。

约束条件为：

(1) 资源约束(总用水量约束)：

①$Q_2+Q_3\leqslant R_1$；②$R_1=Q_t-(Q_1+Q_d)$

式中，Q_t为总供水量($10^8m^3\cdot a^{-1}$)；Q_1为农业总用水量；Q_d为生活总用水量。

(2) 环境约束(总废水量约束)：

$$\frac{Q_2}{q_2}\times p_2+\frac{Q_3}{q_3}\times p_3\leqslant R_2$$

式中，R_2为总废水排放量($10^8m^3\cdot a^{-1}$)。

(3) 经济约束(第一产值约束)：

$$GDP_1\geqslant\frac{P\ F_P\ F_C}{O_f/O_a}$$

式中，GDP_1为第一产值；P为总人口；F_P为人均粮食；F_C为粮食单价；Q_f为粮食产值；O_a为农业总产值。

5. 工业结构优化模型

目标函数：

$$\min COD=\sum_{i=1}^{n}b_i x_i；$$

$$\max X=\sum_{i=1}^{n}x_i$$

式中，x_i为工业第i行业的产值(10^6元)，$i=1,2,3,\cdots,n$为工业行业(n个)；$b_1,b_2,\cdots,n,b_n$为对应各行业COD排污系数[$t\cdot(10^6$元$)^{-1}$]

约束条件：

(1) 工业GDP约束：

$$\sum_{i=1}^{n}x_i\geqslant R_1$$

式中，R_1为某一水平的工业生产总值(10^6元)的要求

(2) 工业供水量约束：

$$\sum_{i=1}^{n}a_i x_i\leqslant R_2$$

式中，a_i为第i行业需水系数[$m^3\cdot(10^6$元$)^{-1}$]，R_2为工业用水可供量(10^6m^3)。

(3) 工业COD排放总量约束：

$$\sum_{i=1}^{n}b_i x_i\leqslant R_3$$

式中，b_i为第i行业COD排污系数[$t\cdot(10^6$元$)^{-1}$]；R_3为工业COD环境容量(t)；即工业水污染控制目标。

(4) 工业废水治理费用约束：

$$\sum_{i=1}^{n}c_i x_i\leqslant R_4$$

式中，c_i为第i行业用于治理废水的资金占其年产值的比例系数；R_4为工业废水治理费用限额(10^6元)。

(5) 工业废水产生量约束：

$$\sum_{i=1}^{n}d_i x_i\leqslant R_5$$

式中，d_i为第i行业废水产生系数[$m^3\cdot(10^6$元$)^{-1}$]；R_5为废水产生总量(10^6m^3)。

模糊聚类神经网络基本原理

王新华、毕建涛：基于模糊聚类神经网络的煤炭资源分类研究
自然资源学报，2001，16(3)

$$\mu_k=\left(\frac{1}{\|x-V_k\|}\right)\bigg/\left(\sum_{j=1}^{n}\frac{1}{\|x-V_j\|}\right)\quad(k=1,2,\cdots,n)$$

式中，V_k为输出节点的权向量。

$$\{V_k^T\}=\frac{1}{1-n}$$

$$Q_{AK}=V_K^T\ X_K,\qquad(k=1,2,\cdots,23)$$

雪深反演模型

柏廷臣，冯学智，李新等：基于被动微波遥感的青藏高原雪深反演及其结果评价　遥感学报，2001，5(3)

$$S_d = 1.59\,(T_{18H} - T_{37H} - 8)$$

式中，S_d 为雪深；T_{18H}和T_{37H}分别为 18GHz 和 37GHz 水平极化条件下的亮度温度。

陆面温度反演模型

潘广东，王超，田国良：SSM/I 微波辐射计数据陆面温度反演　遥感学报，2001，5(4)

$$T_{Bp}(\theta) = \varepsilon_p(\theta)\ T_0$$

式中，$T_{Bp}(\theta)$ 为微波亮温；下标 p 表示极化态(V 或 H)；$\varepsilon_p(\theta)$ 为地物的微波发射率；θ 为观测角；T_0 为地表温度。

基于粗糙海面高度频谱函数的雷达后向散射系数计算模型

董庆，郭华东，王长林：基于粗糙海面高度频谱函数的雷达后向散射系数计算　遥感学报，2001，5(3)

(1) 任一自由海面高度函数 $h(x, y)$ 模型：

$$h(x, y) = a\cos(kx - \omega t)$$

式中，a 为振幅；k 为波数；ω 为基频；t 为雷达系统的单次脉冲时间。

(2) 波面高度和波面斜率的联合概率 $\rho(\xi,\eta)$ 模型：

$$\rho(\xi,\eta) = \frac{NM}{2\pi}\left[1 - 4\eta\sigma k + \left(11.5\eta^2 - 4 + \frac{9M^2\xi^2}{2N^2}\right)\sigma^2 k^2\right]\times$$
$$\exp\left\{-0.5\times\left\{N^2\eta^2 + M^2\xi^2 - \left[2\eta N^2(\eta^2-1) - 4\eta\xi^2 M^2\right]\times\right.\right.$$
$$\sigma k + \sigma^2 k^2 N^2\left[4.125\eta^4 - 6\eta^2 + 1 +\right.$$
$$\left.\left.\left.\frac{9M^2}{4N^2}\eta^2\xi^2 - M^2\left(9.125\eta^2\xi^2 - 4\xi^2 - \frac{9M^2}{4N^2}\xi^4\right)\right]\right\}\right\}$$

$$N = (1 + 8\pi^2 s^2)^{1/2},\ M = (1 + 16\pi^2 s^2)^{1/2},\ \sigma k = 2\pi s$$

式中，σ 为海面高度标准离差；s 为有效波面斜率；k 为波数。

(3) 后向散射系数的计算：

一阶后向散射系数 $\sigma^0(\theta)_{ij}$ 模型：

$$\sigma^0(\theta)_{ij} = 4\pi\, k_e^4 \cos^4\theta \left|g_{ij}(\theta)\right|^2 W(2k_e \sin\theta, 0)$$

式中，i，j 表示系统发射和接收的极化方式；k_e 为电磁波波数；θ 为本地入射角；$W(2k_e\sin\theta, 0)$ 为海面高度函数的 Fourier 变换；$g_{ij}(\theta)$ 为反射系数。

定位原理与定位方程

江月松：机载 GPS、姿态和激光扫描测距集成定位系统精确定位方程、误差分析与精度评估　遥感学报，2001，5(4)

(1) 机载 GPS、姿态和激光扫描测距的三维遥感直接对地定位的线扫描精确定位方程：

$$e(C) = g(C) + R^{-1}(\lambda,\phi,-90,0)R^{-1}(\beta,\alpha,\psi)\times$$
$$\left[R^{-1}(0,0,\psi_s)R^{-1}(\Delta\beta,\Delta\alpha,\Delta\psi)l(L) + gl(B)\right]$$

式中，$g(C) = \left[X_g, Y_g, Z_g\right]^T$ 为 C 参考系中 GPS 天线端点的动态定位矢量，由差分 GPS 接收机给出；λ,ϕ 分别为地球的经、纬度；$l(L) = \left[0,0,|l(L)|\right]^T$ 为定义在激光束坐标系中矢量，由激光测距仪给出；$gl(B) = \left[X_{gl}^B, Y_{gl}^B, Z_{gl}^B\right]^T$ 为定义在遥感平台坐标系中从 g 点到 l 点的矢量，由现场人工测得；β，α 和 ψ 分别为运动平台的偏航、俯仰和侧滚姿态角，由 INS 给出；ψ_s 为线扫描角。

(2) 机载 GPS、姿态和激光扫描测距的三维遥感直接对地定位的圆扫描精确定位方程：

$$e(C) = g(C) + R^{-1}(\lambda,\phi,-90,0)R^{-1}(\beta,\alpha,\psi)\times$$
$$\left[R^{-1}(\beta_s,\alpha_s,\psi_s)R^{-1}(\Delta\beta,\Delta\alpha,\Delta\psi)l(L) + gl(B)\right]$$

式中，$(\beta_s, \alpha_s, \psi_s)$为圆扫描时的扫描角；其他同上。

森林蓄积 LS 估计自变量选择模型

李崇贵，赵宪文：以遥感和地理信息系统为基础的森林蓄积 LS 估计自变量选择研究。遥感学报，2001，5(4)

(1) 蓄积观测值向量 V_0 模型：

$$V_0 = X_q\gamma_q + X_t\gamma_t + e$$

式中，e 为 $n\times 1$ 随机误差向量；γ 为 $p\times 1$ 待定参数向量；X_q和X_t 分别为 q、t 列的列满矩阵。

(2) 平均残差平方和 RMS_q 模型：

$$RMS_q = \frac{V_0'\left[I - X_q(X_q'X_q)^{-1}X_q'\right]V_0}{n-q}$$

第 二 篇

自然地理学

第七章 气 候

海拔高度与气压测算公式

朱炳海：滇南地理气象考察报告. 地理学报，1940，7(1)

$$H = 18\,400(1 + 0.003\,67t)\lg\frac{B_0}{B}\cdot K_1\cdot K_2\cdot K_3$$

式中，$K_1 = 1 - 0.002\,65\cos 2\varphi$；$K_2 = 1 + \frac{h_0 + h}{6\,373\,000}$；$K_3 = 1 + r\frac{e}{p} = 1 + 0.337\frac{e + c_0}{B + B_0}$；$H$ 为海拔高度；B_0 和 b 分别为低处和高处之气压；t 为高、低两处间温度之平均；K_1 为地心加速度 g 之纬度订正；K_2 为 g 之高度订正；K_3 为空中湿度订正。

大气中水分物质循环计算公式

X. П. 帕高西扬：大气中水分物质循环的方式. 地理学报，1954，20(1)

$$R = E + F$$

式中，R 为在某一定地区某段时期中的降水量；E 为同一地区的蒸发量；F 为同一时期的河流流量。

外来降水等于本地蒸发中被送到外地的部分加上河流流量：

$$r = c_2 + F$$

式中，c_2 为当地蒸发(E)中之一部分；r 为外来降水。

起砂风速和砂丘移动速度公式

耿宽宏：起砂风和流砂. 地理学报，1959，25(1)

(1) 各高度上的起砂风速公式：

$$u_z = u_2\frac{z^{-1/3} - z_0^{-1/3}}{2^{-1/3} - z_0^{-1/3}},$$

式中，u_z 为 2m 以上任意高度上的风速；z 为 2m 以上任意高度；u_2 为 2m 高度上的风速；z_0 为地面粗糙度。

(2) 砂丘移动速度公式：

$$c = \frac{443\times 10^{-6}u^3}{P_s H}$$

式中，c 为砂丘移动速度；u 为起砂风速；P_s 为砂子的密度；H 为砂丘的高度。

大气水分循环分析公式

郑斯中，沈阳柱：长江流域的大气水分循环. 地理学报，1959，25(5)

(1) 某一时期内某一高度上的水汽总输送量计算公式：

$$\overline{w} \equiv \frac{1}{T}\int_0^T \frac{1}{g}\left(\frac{\rho_{\overline{w}}}{\rho}\right)\overline{C}\mathrm{d}t \approx \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{g}\left(\frac{\rho_{\omega}}{\rho}\right)\overline{C}_i$$

式中，$\overline{w}$ 为某一高度上某一时期内的平均水汽总输送量($g\cdot cm^{-1}\cdot mb^{-1}\cdot s^{-1}$)；$T$ 为计算的时距；N 为在 T 时距内的观测次数；$\frac{\rho_{\overline{w}}}{\rho}$ 是比湿；g 是重力加速度；$\overline{C}_i$ 是水平风速。

计算出各层的经圈、纬圈水汽总输送量后，再按下式求自地面至 400mb 整层内的水汽输送量：

$$\overline{W} = \int_{P_0}^{P}\overline{w}\mathrm{d}p$$

式中，P_0 为地面气压；P 为所计算空气层上界处的气压；$\overline{W}$ 是整层空气内的水汽总输送量($g\cdot cm^{-1}\cdot s^{-1}$)。

(2) 水分循环系数(水分循环次数)：

$$K = \frac{R}{r}$$

式中，R 为总降水量；r 为外来降水量。

华南冬季温度变化起伏程度计算公式

江爱良：华南冬季降温的基本特征. 地理学报，1959, 25(1)

(1) 表示各级降温量及其出现次数的综合指数 P：

$$P = A_1Q_1 + A_2Q_2 + A_3Q_3 + A_4Q_4,$$

式中，Q_1，Q_2，Q_3，Q_4 分别为(平均每年的)小、中、大、特各级降温量的小计；A_1，A_2，A_3，A_4 为校正系数。

(2) 气温变化起伏的平均日际变率(ΔT)：

$$\Delta T = \frac{\sum_{i=1}^{n}|T_{i+1} - T_i|}{n}$$

式中，T_i 为某一日气温；T_{i+1} 为次日气温；n 为该月的

目数

热量平衡计算公式

黄秉维：广东地面的热量平衡　地理学报，1960，26(3)

$$R-LE+P+A=0$$

式中，R 为地面辐射平衡；LE 为水分蒸发的热量消耗（其中 E 代表蒸发量，L 代表蒸发潜热）；P 为地面与大气之间的乱流热能量；A 为地面与下层土壤间的热量转换。在方程式中，地面得到热量的各项为正值，而地面失去热量的各项则为负值。

划分气候地带的主要指标

丘宝剑、卢其尧：我国热带—南亚热带的农业气候区划　地理学报，1961，27(1)

（1）干燥度：

$$K=\frac{E}{r}=\frac{0.16\sum t}{r}$$

式中，K 为干燥度；E 为可能蒸发量；$\sum t$ 为日平均气温≥10℃时期的"稳定"积温；r 为同时期的降水量；0.16 是一个系数(假定秦岭、淮河一带的可能蒸发量和降水量接近平衡，并比照我国各地的自然景观而得出)

（2）雨量系数：

$$R=\frac{r}{\theta}$$

式中，R 为雨量系数；r 为年降水总量；θ 为年平均气温

降温强度

王鹄贤：华南冬半年降温的特征　地理学报，1962，28(1)

$$I=K_{小}\frac{Q_{小}\cdot N_{小}}{P_{小}}+K_{中}\frac{Q_{中}\cdot N_{中}}{P_{中}}+K_{大}\frac{Q_{大}\cdot N_{大}}{P_{大}}$$

式中，I 为降温强度；$Q_{小}$、$Q_{中}$、$Q_{大}$ 分别为冬半年各月平均的小、中、大三级降温量；$N_{小}$、$N_{中}$、$N_{大}$ 分别为冬半年各月平均的小、中、大三级降温出现的次数；$P_{小}$、$P_{中}$、$P_{大}$ 分别为冬半年各月平均的小、中、大三级降温出现所需的天数；$K_{小}$、$K_{中}$、$K_{大}$ 为小、中、大三级降温比较常数。

斜坡上的降水强度公式

傅抱璞：起伏地形中的小气候特点　地理学报，1963，29(3)

$$r_{\psi,\alpha}=r_0[\cos\alpha+\sin\alpha\tan\theta\cos(\psi-\psi_r)]$$

式中，$r_{\psi,\alpha}$ 为斜坡上的降水强度；ψ_r 为雨滴降落的方位(等于风向)；θ 为其与铅直方向的偏角；ψ 为坡向；α 为坡度。

热量平衡公式

刘森元：海南岛热量平衡　地理学报，1963，29(3)

（1）下垫面热量方程：

$$R=L\cdot E+P+B$$

式中，R 为辐射平衡；L 为蒸发潜热；E 为蒸发量；P 为下垫面与大气之间的乱流热通量；B 为下垫面与其下层之间的热通量。

（2）辐射平衡方程：

$$R=Q\cdot(1-\alpha)-F$$

式中，R 为辐射平衡；Q 为实际有云情况下的总辐射(直接辐射与散射辐射的总和)；α 为下垫面对太阳辐射的反射率；F 为有效辐射(长波辐射平衡)。

海洋和大气的能量交换分析公式

李克让：太平洋上T、V、N天气船站海洋和大气的能量交换及其决定因子　地理学报，1963，29(4)

（1）洋面短波吸收辐射方程：

$$Q_S=Q_S'(1-F)$$

式中，Q_S 洋面短波吸收辐射；Q_S' 为到达洋面的短波辐射能(总辐射)；F 为洋面反照率。

（2）洋面的长波有效辐射方程：

$$Q_b=Q_{b_0}(1-\beta\cdot c)$$

式中，Q_b 为洋面长波有效辐射；β 为一系数，它随 $\frac{c_L}{c}$ 值的变化而变化，可由海洋学常用表查得；Q_{b_0} 为晴天时的有效辐射，它是洋面辐射和大气逆辐射之差。

（3）洋面辐射平衡方程：

$$Q_r=Q_s-Q_b$$

式中，Q_r 为洋面辐射平衡。

（4）洋面与大气的显热交换方程：

$$Q_c=c_z'u_z(T_w-T_z)$$

式中，T_w 和 T_z 分别为水面和 z 高度上的温度；u_z 为 z 高度上的风速；$c_z'=\frac{c_z}{1+\frac{b_z c_z}{k}}$，其中

$c_z = k_0^2 \rho \dfrac{c_p}{\ln^2\left(\dfrac{z+z_0}{z_0}\right)}, b_z = \alpha \dfrac{\mu}{\rho k_0} \ln\left(\dfrac{z+z_0}{z_0}\right)$，$z_0$ 为粗糙参数，k 为空气分子热交换系数，k_0 为水面湍流交换系数，ρ 为空气的密度，c_p 为空气的定压比热，$\alpha = 30$。

(5) 用作蒸发的潜热交换方程：

$$Q_c = E \cdot L_t$$

式中，L_t 为水汽蒸发潜热；E 为蒸发深度；Q_e 为用作蒸发的潜热交换。

(6) 洋面与大气的总能量交换公式：

$$Q_a \approx Q_c + Q_c$$

式中，Q_a 为洋面与大气的总能量交换。

湿润系数和蒸发度的计算模型

杨吾扬：中国陆路交通自然条件评价和区划概要，地理学报，1964,30(4)

(1) 湿润系数：

$$K = \frac{R}{Z}$$

式中，K 为湿润系数；R 为年降水量(mm)；Z 为年蒸发度(mm)。

(2) 蒸发度：

$$Z_m = 0.0018(25 + t)^2(100 - a)$$

式中，Z_m 为月蒸发度(mm)；t 为月平均温度(℃)；a 为月平均相对湿度(%)。

干湿频率的计算模型

钱纪良，林之光：关于中国干湿气候区划的初步研究，地理学报，1965,31(1)

(1) 干燥频率：

$$D_f = \frac{P<0.67E_T\text{的次数}}{N} \times 100\%$$

式中，D_f 为月干燥频率；E_T 为月可能蒸发量；P 为降水量；N 为统计年数。

(2) 湿润频率：

$$W_f = \frac{P>E_T\text{的次数}}{N} \times 100\%$$

式中，W_f 为月湿润频率；E_T 为月可能蒸发量；P 为降水量；N 为统计年数。

太阳辐射和日照时数的经验关系模型

Rijks D A, Huxley P A：坎帕拉（乌干达首都）附近太阳辐射和日照时数的经验关系式，Ecological Applications, 1965, 1(2)

(1) 修正的 Ångström 方程：

$$Q/Q_A = a + bn/N$$

式中，Q 是地面附近某一水平面上接收的每天总太阳辐射；Q_A 是地球大气层上限水平面上接收的太阳辐射；a 和 b 是回归方程中的系数；n/N 是日照时数和总昼长时数的比率。

(2) 从整个时期的每天记录中，可以建立回归方程：

Kabanyolo：

$$Q/Q_A = 0.231 + 0.468n/N \quad (r = 0.92)$$

Namulonge：

$$Q/Q_A = 0.248 + 0.464n/N \quad (r = 0.85)$$

(3) 纬度(ϕ)是系数差异的主要原因，一般方程如下：

$$Q/Q_A = 0.29\cos\phi + 0.52n/N$$

地气系统辐射平衡和大气辐射平衡的计算公式

左大康，陈建绥，李玉海等：东亚地区地球-大气系统和大气的辐射平衡，地理学报,1965, 31(2)

$$B_c = B + B_a = Q_A(1 - \alpha_c) - F$$

$$B_a = B_c - B = Q_A(1 - \alpha_c) - F - B$$

式中，B_c，B_a 和 B 分别为地气系统、大气和地表面辐射平衡；Q_A 为大气上界水平面上的太阳辐射收入；α_c 为地气系统反射率；F 是射出辐射。

净辐射模型及其计算公式

Linacre E T：各表面的净辐射，Journal of Applied Ecology, 1969, 6(1)

(1) 单一气候变量的净辐射模型：

$$Q_n = \frac{(1-\alpha)(T - 0.006h)}{102 - 1.2A} - 32\times10^{-5}(100 - T)\times \left[1 - \frac{4a}{b} + \frac{4(T + 0.006h)}{bQ_A(102 - 1.2A)}\right]$$

$$Q_n = Q_A\left(a + b\frac{n}{N}\right)(1-\alpha) - 16\times10^{-4}\times$$

$$f\left[100 + 0.006h - Q_A\left(a + b\frac{n}{N}\right)(102 - 1.2A)\right]$$

$$Q_n = Q_s(1-\alpha) - 16\times10^{-4}[100 - Q_s(102-1.2A) +$$

$$0.006h](0.8Q_s/bQ_A + 0.2 - 0.8a/b)$$

式中，Q_n 是净辐射强度；α 是可见光辐射的表面反射率；Q_s 是短波背景辐射强度；T 是遮蔽物温度；h 是海拔高度；A 是纬度；Q_A 是宇宙辐射流；a 和 b 是依赖于位置的常数；f 是日照因子：

$$f = 0.2 + 0.8\frac{n}{N}$$

式中，n 是在 N 个小时的昼长里，每天的日照时数。

(2) Penman 净辐射公式：

$$Q_n = Q_s(1-\alpha) - \sigma T_K^4(0.56 - 0.092e_a^{\frac{1}{2}})\left(0.1 + 0.9\frac{n}{N}\right)$$

式中，σ 是 Stefan-Boltzmann 常数；T_K 是遮蔽物温度；e_a 是遮蔽物水汽压。

空气动力学方法评估模型

Coyne P I, Kelley J J：用空气动力学方法从气象上评估阿拉斯加北极苔原的 CO_2 交换．Journal of Applied Ecology, 1975, 12

CO_2 的垂直流动 C：

$$C = \frac{k^2(u_2 - u_1)(c_2 - c_1)}{\left[\ln\frac{z_2 - d}{z_1 - d}\right]^2}$$

式中，k 是 von Karman 常数；u_2 和 u_1 是高度 z_2 和 z_1 上的风速；c_2 和 c_1 是高度 z_2 和 z_1 处 CO_2 的体积浓度；d 是零风参考平面的高度。

开垦地的热量平衡特征模型

谢贤群，鲍士柱：海拉尔东部开垦地与草场地表热量平衡及其对尘埃输送的影响．地理学报, 1978,33(2)

(1) 下垫面辐射平衡方程：

$$B = S + D - R_K - B_L$$

式中，S 为到达下垫面上的直接太阳辐射能量；D 为天空散射辐射通量；$S+D=Q$ 为太阳总辐射通量；R_K 为下垫面反射辐射通量；$\frac{R_K}{Q} = A_K$ 为下垫面反射率；B_L 为下垫面净余长波辐射通量(有效辐射)；B 为下垫面净余辐射通量(辐射平衡)。

(2) 热量平衡方程：

$$B = P + LE + F$$

式中，P 为下垫面与空气间的湍流热交换通量；LE 为下垫面蒸发耗热量；F 为地面与土壤内的热交换通量。

湍流热交换通量 P 和蒸发耗热量 LE 可用近地面层空气中热量和水汽扩散方程求得，即：

$$P = C_P\rho K_T\frac{\partial T}{\partial z}$$

$$LE = L\rho K_w\frac{\partial q}{\partial z}$$

式中，K_T 和 K_w 分别为空气热量和水汽的湍流交换系数；$\frac{\partial T}{\partial z}$ 和 $\frac{\partial q}{\partial z}$ 分别为空气温度和空气温度的垂直梯度；C_P 为空气定压比热；L 为蒸发潜热；ρ 为空气密度。

水热平衡联系方程

崔启武，孙延俊：论水热平衡联系方程．地理学报, 1979, 34(2)

(1) 水量平衡方程：

$$r = f + E(对多年平均情况)$$

式中，r 为降水量($g\cdot cm^{-2}$)；f 为径流量($g\cdot cm^{-2}$)；E 为蒸发量($g\cdot cm^{-2}$)。

(2) 热量平衡方程：

$$R = P + LE(对全年平均情况)$$

式中，R 为辐射差额($kcal\cdot cm^{-2}$)；P 为乱流热通量($kcal\cdot cm^{-2}$)；L 为每克水变成水汽所需吸收的热量,约等于 $0.6\ kcal\cdot g^{-1}$。

(3) 水热平衡新联系方程：

$$E = \frac{Rr}{R + A + Lr}$$

式中，A 是与变量 R 和 r 无关的一个参数。

西藏高原 1～12 月平均温度的估算公式

侯光良，蒋世逵：西藏高原 1～12 月平均温度的估算问题．地理学报, 1980, 35(3)

(1) 忽略了区域性自然地理因子的温度估算公

式：

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_4X_4$$

式中，X_1 为纬度(°)；X_2 为高度(100m)；X_3 为日照百分率$\left(\frac{n}{N}\times 100\right)$；$X_4$ 为湿润系数；B_0 为常数项；B_1、B_2、B_3和B_4 分别为常系数。

(2) 区域性自然地理因子对温度的影响：

$$C_i^s = \frac{1}{6}\sum_{j=1}^{9}(Y_{ij} - \hat{Y}_{ij})$$

$$C_i^w = \frac{1}{6}\left[\sum_{j=10}^{12}(Y_{ij} - \hat{Y}_{ij}) + \sum_{j=1}^{3}(Y_{ij} - \hat{Y}_{ij})\right]$$

式中，C_i^S 和 C_i^w 分别表示各点的 C_{ij} (区域自然地理因子对温度影响)的夏半年(4 ~ 9 月)与冬半年(10 ~ 12 月,1~3 月)的平均值；Y 为温度观测数据；$\hat{Y}$ 为未考虑区域性自然地理因子的估算值。

旱涝指标公式

顾庭敏，宫德文，沈建柱等：山东省旱涝气候区划. 地理学报, 1980, 35(3)

(1) 干燥度：

$$K = \frac{E}{P}$$

式中，E 为可能蒸散量；P 为降水量。

(2) 旱涝指数：

$$DW = \frac{\alpha E}{P(1-\sigma)}$$

式中，α 为经验系数；σ 为径流系数；P_σ 为径流量。

蒸发力计算公式

王本善：计算蒸发力的M. И. Будыко 方法之简化及与H. L. Penman 法的比较. 地理学报, 1980, 35(4)

(1) M. И. Будыко 公式：

$$E_0 = \rho D(q_s - q_a')$$

式中，ρ 为空气密度；D 为外扩散系数；q_s 为与蒸发面温度 T_s 相应的饱和比湿；q_a' 为空气的实际比湿。

(2) 王本善公式：

$$E_0 = \frac{\Delta H + \left(\gamma + \frac{4\delta\sigma R_n T_a^4}{LD}\right)E_a}{\Delta + \left(\gamma + \frac{4\delta\sigma R_n T_a^4}{LD}\right)} \quad (\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$$

式中，δ 为灰体辐射系数；σ 为史蒂芬-玻尔兹曼常数；T_a 为气温；L 为蒸发潜热；R_n 为水汽的比气体常数；R_0 为据气温算出有效辐射时所得的蒸发面湿润状况下的辐射平衡值；Q 表示蒸发面与其下层土壤间的热交换量；$H = R_0 - Q_0$；D 为外扩散系数；$\Delta = \frac{e_s - e_a}{T_s - T_a}$，其中 e_a 为与气温 T_a 相应的饱和空气的水汽压，e_s 为与气温 T_s 相应的饱和空气的水汽压；$\gamma = \frac{\rho C_p R_n T_a}{L}$。

(3) H.L.Penman 公式：

$$E_0 = \frac{\Delta H + \gamma E_a}{\Delta + \gamma}$$

最大晴天总辐射的多元回归方程

张炯远、冯雪华、倪建华：用多元回归方程计算我国最大晴天总辐射能资源的研究。自然资源，1981，1

(1) 地球表面水平面上的晴天总辐射日总量 Q_0 模型：

$$Q_0 = \left(\frac{R_0}{R}\right)^2 I_0 \int_{-t_0}^{t_0} (\tau_h + \tau_{wh}) \sin h dt$$

式中，$\left(\frac{R_0}{R}\right)^2$ 为平均日地距离订正因子；R_0 为日地之间的平均距离；R 为某一时刻的实际日地距离；I_0 为太阳常数；$-t_0$,t_0 为日出、日落时间；h 为太阳高度角；τ_h 是随波长、时间而变化的复杂函数；τ_{wh} 为只包括大气水汽、臭氧、二氧化碳等气体吸收的透射比函数。

(2) 最大晴天总辐射回归方程：

$$\hat{Q}_{0i} = C_{0i} + C_{1i}N + C_{2i}H + C_{3i}e$$

$$(i = 1,2,3,\cdots,12(\text{月}))$$

式中，$\hat{Q}_{0i}$ 为 1~ 12 月各月的最大晴天总辐射月总量；N 为地理纬度；H 为海拔高度；e 为月平均绝对湿度；C 为方程待定系数。

非水平面上实际日射强度和日射日总量的计算公式

李怀瑾，施永年：非水平面上日射强度和日射日总量的计算方法。地理学报，1981，36(1)

(1) 晴天实际日射强度：在散射辐射各向同性的

假定下，坡地总辐射强度为：

$$Q_{\alpha,A_n}=S_{\alpha,A_n}+\frac{D(1+\cos\alpha)}{2}+\frac{R_K(1-\cos\alpha)}{2}$$

式中，S_{α,A_n} 为任一坡地上直接太阳辐射强度；A_n 为坡地方位(从子午线算起，顺时针方向为正，反之为负)；α 为坡度；D 为水平面上散射辐射强度；R_K 为坡前水平面上反射辐射值；且：

$$S_{\alpha,A_n}=S_m[\cos\alpha(\sin\varphi\sin\delta+\cos\varphi\cos\delta\cos\omega)-\sin\alpha(T\sin A_n\cos\delta\sin\omega)]$$

式中，$T=\cos A_n[\tan\varphi(\sin\varphi\sin\delta+\cos\varphi\cos\delta\cos\omega)-\sec\varphi\sin\delta]$ S_m 为与光线垂直表面上的太阳辐射强度；φ 为地方纬度；δ 为赤纬；ω 为时角。

(2) 非水平面上晴天实际日射日总量：在散射辐射各向同性假定下，坡地总辐射日总量为

$$\sum Q_{\alpha,A_n}=\sum S_{\alpha,A_n}+\sum D\left(\frac{1+\cos\alpha}{2}\right)+\sum R_K\left(\frac{1-\cos\alpha}{2}\right)$$

地极移动对气压场和大气活动中心可能影响的分析公式

彭公炳，陆巍：气压场和大气活动中心对地极移动的若干响应。地理学报，1981，36(1)

$$\Delta H_p=\frac{1}{2}m\omega^2R^2(y\sin\lambda-x\cos\lambda)\sin 2\varphi\left(\frac{1+k-h}{g}\right)$$

式中，m 为地球上某点的质量；ω 为地球自转平均角速度(等于 $0.729\times10^{-4}s^{-1}$)；R 为地球平均半径(等于 637,122,800cm)；x，y 为地极坐标(以弧秒表示)；λ 为地理经度(这里取东经)；φ 为地理纬度(北半球为正，南半球为负)；g 为重力加速度；$(1+k-h)$ 为地壳的弹性形变系数。

月总辐射模型

王炳贤，赵名茶：中国的总辐射的空间分布特征与光合潜力 自然资源，1981，3

$$Q_c=Q_A(a+bS'/S)$$

式中，Q_c 为计算得出的实际总辐射；Q_A 为大气上界的太阳辐射；S' 为日照时数；S 为可照时数；a,b 为系数。

平均水汽含量的计算公式

郭进上，刘惠兰：我国平均水汽含量分布的基本特点及其控制因子 地理学报，1981，36(4)

$$W=\frac{1}{g}\int_{p_z}^{p_0}q\mathrm{d}p$$

式中，W 为水汽含量(mm)；g 为重力加速度($g\cdot cm^{-2}$)；p_0 为地面气压(mb)；p_z 取 200mb。

计算大气影响的表达式

朱志辉：太阳辐射时空分布的多因子计算 地理学报，1982，37(1)

(1) 计算总辐射的一般表达式：

$$Q=S_0f(a,b)\varphi(S_1,n)$$

式中，Q 表示地面总辐射；$f(a,b)$ 和 $\varphi(S_1,n)$ 分别表示大气透明状况和遮蔽状况对总辐射的减弱函数；S_0 表示天文辐射。

(2) 计算 Q/S_0 的经验方程：

$$Q/S_0=0.2064+0.02015x_1+0.5910x_2-0.007131x_3-0.001188x_6$$

式中，x_1 为高度；x_2 为相对日照；x_3 为月平均绝对温度；x_6 为月的烟幕日数。

北半球自然地带性数学模式

蒋忠信：关于自然地带性数学模式之商讨 地理学报，1982，37(1)

$$H=a\exp[-b(\phi-d)^2]-c$$

式中，H 为高度(m)；φ 为纬度(°)；a，b，c，d 为正常数。

由最小二乘法得雪线(最高与最低高度之平均值)自然带的分布函数为：

$$H=5462e^{-0.0006353(\phi-18.5)^2}-250$$

树线为：

$$H=4726e^{-0.0007129(\phi-15.5)^2}-500$$

山地寒漠土为：

$$H=10480e^{-0.00008188\phi^2}-6000$$

风雪流的起动与运行分析公式

王中隆：天山地区风雪流运动特征及其预防研究 地理学报，1982，37(1)

(1) 风雪流中风速随高度分布方程：

$$V_z = V_t + 5.75V_* \lg\frac{Z-hd}{Z_t}$$

式中，V_t 为高度 Z 处的起动风速(m·s⁻¹)；V_* 为摩擦速度(m·s⁻¹)；hd 为地形影响高度层(m)；Z_t 为聚集点的高度(m)。

(2) 吹雪输送率：

$$q_m = a(V_{10} - V_t)^3$$

式中，q_m 为吹雪输送率(g·s⁻¹·m⁻¹)；a 为随天气条件、吹雪性质、积雪密度、起动风速的变化而变化的系数；V_t 和 V_{10} 分别为风速和 10m 高处的起动风速(m·s⁻¹)。

(3) 山区风雪流的发育长度：

$$L_{sd} = \frac{d}{Q_2/Q_1}$$

式中，L_{sd} 为吹雪发育所必需的距离称为吹雪的发育长度；Q_1 和 Q_2 分别为迎风向与下风向沟内单位宽度的堆雪量(g·cm⁻¹)；d 为在面积为 840× 400m² 的平缓山坡积雪源地上所开挖的间距(m)。

(4) 下导风吹刮宽度的公式：

$$W = CH\sin(\alpha - \delta)\sin\gamma\cos\beta$$

式中，α 为导板倾角(°)；δ 为气流扩散角(一般取 11°)；β 山坡坡度(°)；γ 为风向与下导风走向的夹角(°)；C 为系数；W 为吹刮宽度。

(5) 侧导板尾部雪堤方向计算公式：

$$\varphi = \arctan\left(\frac{1}{2}\tan\theta\right) + 11°$$

式中，φ 为侧导板尾部雪堤方向(°)；θ 为侧导板尾部板面与立风向的夹角(°)。

(6) 栅栏的阻雪量和栅后雪堤长度计算式：

$$Q = 1081\frac{H}{100-d}$$

$$L = \frac{980\times 4H}{109-d}$$

式中，Q 为栅栏阻雪量(m³·m⁻¹)；L 为栅后雪堤长度(m)；H 为栅高(m)；d 为栅栏的透风度。

山地气象要素垂直分布规律的数学模型

华伯钧：辽东山地气象要素垂直分布与垂直农林带. 地理研究，1982，1(3)

(1) 旬积温与高程的回归方程

夏季(6 月)：

$$\sum T = 228.1 - 0.082H \quad (\gamma = 0.85)$$

冬季(9 月)：

$$\sum \bar{T} = 177.0 - 0.043H \quad (\gamma = 0.93)$$

式中，$\sum \bar{T}$ 为旬积温；H 为高程。

(2) 无霜期随高度变化的经验公式：

$$N = 286H^{-0.123}$$

式中，N 为无霜期，H 为海拔高度。

大气污染程度计算

张景哲：风的污染指数及其频率——城市总体规划中的一个气候学问题. 地理研究，1982，1(4)

(1) 大气污染程度计算：

$$Id = \frac{CS}{uh}P$$

式中，I 为大气污染指数；d 为风向；S 为大气稳定度；u 为风速；h 为混合层厚度；P 为降水；C 为系数。

(2) 污染指数频率：

$$Fd_i = \frac{n}{N}\times 100\%$$

式中，F 为污染指数频率；d 为风向；i 为污染指数等级；n 为 d_i 出现的总次数；N 为观测年份内的观测总次数。

气候生产潜力的阶乘型数学模型

张其书：气候生产潜力的阶乘型数学模式. 自然资源，1982，4

$$W = ChQ_q(1-\alpha)P_t(1-R_{t_0})Kf$$

式中，W 为气候生产潜力；C 为换算系数；h 为光合作用能量效率；α 为植物群体反射率；Q_q 为生育期内的光合有效辐射量；P_t 为温度对光合产量的订正函数；R_{t_0} 为植物群体呼吸作用损失光合产物的百分比；K 为叶面积生长动态订正系数；f 为气候水分条件对光

合生产潜力的修正系数。

球坐标连续方程

查良松：115° E经圈垂直环流与我国东部汛期雨带的变动. 地理学报，1983, 38(1)

$$D+\frac{\partial\omega}{\partial P}=0$$

$$D=\frac{1}{r\cos\varphi}\frac{\partial u}{\partial\lambda}+\frac{1}{r}\frac{\partial v}{\partial\varphi}-\frac{v\tan\varphi}{r}$$

式中，D 为各层的散度；ω 为各层的垂直速度；r 为地球半径；φ 为纬度；λ 为经度；u 和 v 分别为纬向和经向。

蒸发力的计算公式

王懿贤：彭门蒸发力快速表算法. 地理研究，1983, 2(1)

(1) 自由水面蒸发的计算公式：

$$E_0=\left(\delta H/L+\gamma E_a\right)\Big/\left(\delta+\gamma\right)$$

式中，E_0 及 E_a 分别为自由水面的蒸发及空气干燥力；$\delta\left(=\frac{d_{e_w}}{dT_a}\right)$ 及 γ 分别为饱和水汽压曲线在气温为 T_a 时的斜率及干湿球湿度公式中的常数；H 为自由水面辐射平衡；L 为蒸发潜能。

(2) 蒸发力的计算公式(彭门公式)：

$$E_T=\left(\delta H_G/L+\gamma E_a\right)\Big/\left(\delta+\gamma\right)$$

$$H_G=Q_A(1-r)\left(0.18+0.55\frac{n}{N}\right)-$$

$$\sigma T_a^4\left(0.56-0.092\sqrt{e_d}\right)\left(0.10+0.90\frac{n}{N}\right)$$

式中，Q_A 为安哥数值，化为蒸发相当量；r 为反射率，对开阔水体其值为0.05，湿润裸土采用0.1，新鲜的常绿植被采用0.2；$\frac{n}{N}$ 为日照百分率；δT_a^4 为气温 T_a 时的黑体辐射，也化为蒸发相当量；e_d 为实际水汽压。

(3) 计算 H_G 公式的改进：

$$H_G=(Q+q_0)\left(0.248+0.752\frac{n}{N}\right)(1-r)-$$

$$\sigma T_a^4\left(0.56-0.08\sqrt{e_d}\right)\left(0.1+0.9\frac{n}{N}\right)$$

(4) 道尔顿公式：

$$E_a=\left(e_a-e_d\right)f(u)$$

式中，e_a 为气温 T_a 时的饱和水汽压；e_d 为空气的水汽压；$\left(e_a-e_d\right)$ 为饱和差；$f(u)$ 为水平风速 u 的函数

(5) 道尔顿公式的改进：

$$E_a=0.26\left(1+9.8\times10^{-3}u_2\right)\left(e_a-e_d\right)$$

式中，u_2 为2米高度处的平均风速。

(6) 蒸发力的计算公式：

$$E_T=\frac{\delta}{\delta+\upsilon}\frac{1}{L}\left[(Q+q_0)\left(0.248+0.752\frac{n}{N}\right)(1-r)\right]-$$

$$\frac{\delta}{\delta+\upsilon}\frac{1}{L}\left[\sigma T_a^4\left(0.56-0.08\sqrt{e_d}\right)\left(0.1+0.9\frac{n}{N}\right)\right]+$$

$$\frac{\upsilon}{\delta+\upsilon}\left[0.26\left(1+9.8\times10^{-3}u_2\right)\left(e_a-e_d\right)\right]$$

式中，$\frac{\delta}{\delta+\upsilon}$ 及 $\frac{\upsilon}{\delta+\upsilon}$ 为射入的热量转换成水蒸气能效力的“加权因子”。

水汽输送分析公式

王德瀚：淮河洪泽湖以上流域夏季水汽输送. 地理学报，1983, 38(3)

(1) 在任一高度，T 时段内的平均水汽输送公式：

$$\overline{qV}=\bar{q}\overline{V}+\overline{q'V'}$$

式中 q 为比湿；V 为风速矢量；横线表示对时间的平均；带撇的量表示对平均值的偏差。

(2) 水汽通量散度：

$$D_W=\frac{1}{A}\oint_L qv_n\mathrm{d}L=\frac{1}{A}\oint W_n\mathrm{d}L$$

式中，v_n 和 W_n 分别为与面积 A 的边界 L 正交的向外风分量和水汽输送。

(3) 水汽输送的日相对变化率：

$$RV=\left|\frac{A_{08}-A_{20}}{\bar{A}}\right|$$

式中，A_{08} 和 A_{20} 分别为8时和20时的某物理量 A 的值；$\bar{A}$ 为其平均值。

坡面天文辐射总量模型

寇有观：我国西部山区太阳辐射与高山冰川消融. 自然资源，1983, 3

$$W_{\beta\alpha}=\frac{I_0T_g}{4\pi^2\sqrt{1-e^2}}\times\{[V(b_2-b_1)+\sin\beta\sin\alpha(o_2-o_1)]\times$$

$$(\lambda_2-\lambda_1)-K[u(a_2-a_1)+V(o_2a_2'-o_1a_1')-$$

$$\sin\beta\sin\alpha(b_2a_2'-b_1a_1')](\cos\lambda_2-\cos\lambda_1)+$$

$$\frac{1}{8}K^2[2u(a_2'-a_1')-V(b_2-b_1+b_2(a_2')^2-$$

$$b_1(a_1')^2)-\sin\beta\sin\alpha(o_2-o_1+o_2(a_2')^2-$$

$$o_1(a_1')^2)]\times[2(\lambda_2-\lambda_1)-(\sin2\lambda_2-\sin2\lambda_1)]\}$$

$$u=\cos\phi\cos\alpha+\cos\phi\sin\alpha\cos\beta$$

$$V=\cos\alpha\cos\phi-\sin\phi\sin\alpha\cos\beta$$

式中，β 为坡向角；α 为坡度角；I_0 为太阳常数；T_g 为一年的时间长度；e 为地球轨道椭圆的离心率；λ 为太阳黄经(°)；$K=\sin\theta$；θ 为黄道平面与赤道平面的角交；$a=\omega(0)$；$b=\sin\omega(0)$；$c=\cos\omega(0)$；$a'=\omega'(0)$；ω 为时角。

黄土高原的暴雨特性分析公式

张汉雄：黄土高原的暴雨特性及其分布规律.地理学报，1983.38(4)

(1) 暴雨强度与历时的关系：

$$i=\frac{S_N}{(t+d)^n}=\frac{AN^n}{(t+d)^n}$$

式中，i 为点暴雨强度；t 为降水历时；S_N 为雨力(N 年一遇暴雨的最大 1 分钟雨量)；N 为某一暴雨强度出现一次的年数；A 为雨力参数(一年一遇之雨力)；a 为雨力递增指数；n 为暴雨强度衰减指数；d 为时间参数。

(2) $\eta-F$ 之定量关系：

$$\frac{1-\eta}{\eta}=bF^c$$

式中，η 为点面折减系数；F 为等雨量面积或流域面积(km²)；b 和 c 为待定参数。

(3) 暴雨的面平均强度：

$$i_{面}=\eta\cdot i=\frac{\eta AN^a}{(t+d)^n}\approx\frac{\eta AN^a}{t^n}$$

(4) 暴雨的时-深关系：

$$h=it=S_Nt^{1-n}=AN^at^{1-n}$$

式中，A、a、n 均为常数。

晴天太阳总辐射分布特征分析方法

刘书楼，陈宝变：我国晴天太阳总辐射分布特征——计算机在太阳辐射研究中的应用 地理学报，1983.38(4)

(1) 基本方程：

$$Q_0=Q_B+q_0$$

式中，Q_0 为晴天总辐射；Q_B 为太阳直接辐射；q_0 为散射辐射。

(2) 多元回归方程：

$$Q_0=b_0+b_1\phi+b_2\phi^2+b_3H+b_4H^2$$

$$Q_{0i}=b_{0i}+b_{1i}\phi+b_{2i}H+b_{3i}E$$

式中，b_0,b_1,b_2,b_3,b_4 为相应项的回归系数；i=1,2，…，12 表示月份；ϕ 为纬度(°)；H 为海拔(m)；E 为月平均绝对湿度(mb)。

(3) 临近点代替法：

设 $T_i(X_i,Y_i,Q_{0i})$ 为所求的任意点，X_i,Y_i 为坐标，Q_{0i} 为该点的晴天总辐射；$T_n(X_n,Y_n,Q_{0n})$ 为参考点，则选取 T_n 代替 T_i 点的逻辑判别式为，

$$R=\left|\left[(X_i-X_n)^2+(Y_i-Y_n)^2\right]^{\frac{1}{2}}\right|_{\min}$$

式中，R 为计算点到特征点的距离。

(4) 平均法：

$$Q_{0i}=\frac{1}{4}(Q_{01}+Q_{02}+Q_{03}+Q_{04})$$

式中，$T_1(X_1,Y_1,Q_{01})$，$T_2(X_2,Y_2,Q_{02})$，$T_3(X_3,Y_3,Q_{03})$，$T_4(X_4,Y_4,Q_{04})$ 为四个参考点。

(5) 双线性插补法：

将 T_1,T_2,T_3,T_4 依次相连，设连线与坐标轴的交点分别为 $T_{12}(X_{12},Y_{12},Q_{012})$，$T_{23}(X_{23},Y_{23},Q_{023})$，$T_{34}(X_{34},Y_{34},Q_{034})$，$T_{41}(X_{41},Y_{41},Q_{041})$，则：

$$Q_{0x}=Q_{023}+\frac{(Q_{041}-Q_{023})\cdot|X_i-X_{23}|}{|X_{41}-X_{23}|}$$

$$Q_{0y}=Q_{034}+\frac{(Q_{012}-Q_{034})\cdot|Y_i-Y_{34}|}{|Y_{34}-Y_{12}|}$$

(6) 双线性插补加权平均法：

$$Q_{0i}=\frac{1}{2}(Q_{0x}+Q_{0y})$$

蒸发力计算公式(彭曼公式)

仰惠南：用自然地理观点探讨蒸发力. 地理学报，1984，39(1)

$$E_p = \frac{\frac{\phi'}{\gamma}R + E_a}{\frac{\phi'}{\gamma} + x} = \frac{\phi' R + \gamma E_a}{\phi' + \gamma x}$$

式中，E_P 为蒸发力值($mm \cdot d^{-1}$)；R 为蒸发面充分湿润状态下的辐射平衡值(以其热量所能汽化的水分毫米数计)；ϕ' 为相当于蒸发面温度的饱和水汽压随温度而变化的斜率($mm \cdot ℃^{-1}$)；γ 为干湿表常数(取0.5mm·K^{-1})；E_a 为空气干燥力；x 为气孔与日长因素(在一般情况下设其量为1)。

风能模型

耿宽宏：我国沙区的风能资源. 自然资源，1984，1

$$A_n = \rho F V \xi / 2 \quad (kg \cdot m \cdot s^{-1})$$

式中，ρ 为空气密度；V 为风速；F 为叶轮旋转圆面积；ξ 为风能利用系数。

多年冻土地带性分析公式

程国栋：我国高海拔多年冻土地带性规律之探讨. 地理学报，1984，39(2)

(1) 纬度地带性(北半球)：

$$H = 3650\exp\left[-0.003(\varphi - 25.37)^2\right] + 1428$$

式中，H 为多年冻土下界高度(m)；φ 为地理纬度(°)。

(2) 干燥度地带性(以祁连山为例)：

$$H = 7789.5 - 121.3\varphi + 8.3\omega$$

式中，ω 为降水大陆度，且 $\cot\omega = \dfrac{\text{年降水量(mm)}\times 10}{\text{海拔高度(m)}}$；$H$ 为多年冻土下界高度(m)；φ 为纬度(°)。

高原贴地层 R_i 数

马玉堂：青藏高原暖季贴地层大气的层结稳定度分析. 地理研究，1984，3(2)

(1) R_i 数的表达式：

$$R_i = \frac{g}{T}\frac{\frac{\partial\theta}{\partial z}}{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2} = \frac{gz}{T}\frac{\Delta\theta}{(\Delta u)^2}\ln\frac{Z_2}{Z_1}$$

式中，g 为重力加速度；T 为空气的绝对温度；θ 为位温；u 为风速；Z 为高度；$\dfrac{\partial\theta}{\partial z} = \dfrac{\theta_2 - \theta_1}{Z\ln\frac{Z_2}{Z_1}}$ 为位温梯度，$\dfrac{\partial u}{\partial z} = \dfrac{u_2 - u_1}{Z\ln\frac{Z_2}{Z_1}}$ 为风速梯度，其中 $Z = \sqrt{Z_1 Z_2}$，θ_2、θ_1、u_2，u_1 分别是相应于高度 Z_2 和 Z_1 的位温及风速；$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1, \Delta u = u_2 - u_1$。

(2) 基本公式：

$$\varphi_m\left(\frac{Z}{L}\right) = \frac{K_Z}{V_*}\frac{\partial u}{\partial z}$$

$$\varphi_h\left(\frac{Z}{L}\right) = \frac{K_Z}{T_*}\frac{\partial\theta}{\partial z}$$

式中，Z 为高度；L 为 $M_{OHHH} - OB_{XOB}$ 长度；V_* 为动力速度；T_* 为特征温度；K 为卡门常数；φ_m,φ_h 为相应于动量和热量的两个确定的函数。

(3) Z/L 与 R_i 数相应关系：

$$R_i = \frac{Z}{L}\varphi_h / \varphi_m^2$$

(4) 实验后得出公式：

$$\varphi_m = \begin{cases} 1 + \beta_m Z/L & (Z/L > 0) \\ (1 - \gamma_m Z/L)^{-1/4} & (Z/L \leqslant 0) \end{cases}$$

$$\varphi_h = \begin{cases} 1 + \beta_h Z/L & (Z/L > 0) \\ (1 - \gamma_h Z/L)^{-1/2} & (Z/L < 0) \end{cases}$$

式中的参数由实验决定。

光合生产潜力模型

陈明荣，龙斯玉：中国气候生产潜力区划的探讨. 自然资源，1984，3

(1) 潜在光合产物 G_r 模型：

$$G_r = mQ_g(1 - \alpha)$$

式中，Q_g 为生理辐射；m 为参数；α 为植物对生理辐射的反射率。

(2) 温光生产力 G_M 模型：

$$G_M = mQ_g(1 - \alpha)P_t(1 - R)$$

式中，P_t 为无因次的相对光合速率；$R = 7.825 + 1.145t$，t 为温度。

太阳总辐射模型

耿宽宏：我国沙区的太阳能资源　自然资源，1985，1

$$(Q+q)_c=(Q+q)_0\left(a+b\frac{S}{S_0}\right)$$

式中，$(Q+q)_0$ 为按纬度平均可能年总辐射量，仅取决于高度；a,b 为回归系数；$\frac{S}{S_0}$ 为日照率。

气候学中的反射率公式

傅建贤：浅谈研究第四纪冰期气候在方法上的若干问题——兼论庐山冰期气候　地理学报，1985，40(3)

$$\alpha_g(\theta)=\alpha_1+(1-\alpha_1)\exp[-k(90-\theta)]$$

式中，$\alpha_g(\theta)$ 为天顶距为 θ 时的反射率；θ 为天顶距；k=0.1；α_1 为天顶距为 0° 时的反射率。

理想气体状态方程

李继由：试论农业气候资源——二氧化碳　自然资源，1985，4

$$\rho=\frac{P}{RT}$$

式中，ρ 为空气的密度；P 为空气的压力；R 为气体常数；T 为空气的温度，以绝对温表示。

山地降水量分析公式

汤懋苍：祁连山区降水的地理分布特征　地理学报，1985，40(4)

$$R=R_1(\lambda,\varphi,Z_0)+R_2(Z-Z_0)+R_3(\theta,\alpha)$$

式中，λ 和 φ 分别为该点的经度和纬度；Z_0 为某种参考高度；Z 为实际地形高度；θ 和 α 分别为该点的小地形坡向和坡度。

有效辐射公式

陈明容：青藏高原夏季地面有效辐射随高度的变化　地理研究，1985，4(4)

(1) 晴天有效辐射——布朗特公式：

$$F_0=\delta\sigma T^4\left(a_1+b_1\sqrt{e}\right)$$

式中，F_0 为晴空条件下地面有效辐射通量；σ 为波兹曼常数；δ 为比辐射率；a_1,b_1 为常数；T 为气温；e 为水汽压。

(2) 云天的有效辐射：

平原地区：

$$F=F_0\left(1-C_{hm}n_{hm}-C_1n_1\right)$$

高原地区：

$$F_p=F_0\left(1-C_{hm}n_{hm}-C_1n_1\right)\times\left[3.112-2.721\left(\frac{P}{P_0}\right)^{0.8}+0.588\left(\frac{P}{P_0}\right)^{1.6}\right]$$

式中，n，n_h，n_m，n_1 分别为总云量和高、中、低云量；c，c_h，c_m，c_1 为相应的系数。

能量密度计算公式

黄忠恕：青藏高原热状况域大气超长波的关系　地理研究，1986，5(1)

$$E_k\approx\frac{1}{2}\rho C_k\approx\frac{1}{2}\rho A_k^2k^2$$

式中，E_k 为 k 波的能量密度；C_k 为 k 波的能量密度指数；ρ 为空气密度；A_k 为 k 波的波幅；k 为闭合纬圈内的波数。

生长的 ARMA 模型

Guiot J：模拟树木年轮对气候的反应和重建古气候变迁的 ARMA 技术　Ecological Modelling，1986，33

$$C_t=0.95C_{t-1}+0.008P_{t-1}+0.32T_{t-1}-0.014P_t-0.58T_t+e_t$$

式中，C_t 表示在时间 t 的生长；P_t 是在时间 t 的降水量；T_t 是在时间 t 的温度；e_t 是误差，观测是基于 1947~1974 年 Vallée des Merveilles (Alpes Maritimes, France)地区 12 个落叶松个体的树干。

压高公式

李天顺，刘塔：地形与黄土高原的气候　地理研究，1986，5(2)

$$H_s=H_0+\frac{R}{g}T_m\ln\frac{P_0}{P_s}$$

式中，H_0 为测站的海拔高度；H_s 为标准等压面的海拔高度；P_0 为地面气压；P_s 为气柱平均高度；R，g 为常数。

中国地区太阳紫外辐射分析公式

周允华：中国地区的太阳紫外辐射　地理学报，1986，41(2)

(1) 紫外直接辐射的计算：

$$\lg S_\Delta=a+b\lg S$$

式中，S_Δ 为垂直于光线平面上的紫外直接辐射通量值；S 为垂直于光线平面上全波段的太阳直接辐射通量；$a=0.235\lg E^*-1.839$；$b=3.452-0.0102E^*$；E^*

为订正后的地面水汽压，$E' = \frac{P_0}{P}E$，P_0 为标准大气压，P 为测点大气压，E 为地面水汽压。

(2) 晴朗天气条件下的紫外散射辐射：

$$D_{0\Delta} = 0.5\left[\left(\frac{R_0}{R}\right)^2 \varphi_\Delta - S_{0\Delta}\right]\sin h$$

式中，$D_{0\Delta}$ 为晴朗天气条件下水平面上接受到的天空紫外散射辐射通量；R_0 和 R 分别为平均的和实际的日地距离；$S_{0\Delta}$ 为晴朗天气条件下到达地面的垂直于入射方向平面上紫外直接辐射通量；h 为太阳高度；$\omega_\Delta = \int_{0.3}^{0.4} I_{0\lambda} e^{-k_\lambda l m_k} \mathrm{d}\lambda$，$l$ 为 O_3 的厚度、k_λ 为 O_3 吸收系数。

(3) 晴朗天气条件下的紫外总辐射能通量：

$$Q_{0\Delta} = S_{0\Delta}\sin h + D_{0\Delta}$$

式中，$Q_{0\Delta}$ 为晴朗天气条件下紫外总辐射；$S_{0\Delta}$ 为晴朗天气条件下垂直入射方向平面上的紫外直接辐射通量。

(4) 实际天气条件下的紫外散射辐射：

$$D_\Delta = \eta_{D0}(1-n)D_0 + 1.1\eta_{Q0}[D-(1-n)D_0]$$

式中，D_Δ 为实际天气条件下水平面上定时的紫外散射辐射通量；n 为定时的月平均总云量；D_0 为晴朗无云时定时的积分散射辐射能量；η_{D0} 和 η_{Q0} 分别为晴朗天气条件下紫外散射辐射和紫外总辐射在相应的积分辐射中所占的比例。

(5) 实际天气条件下的紫外总辐射：

$$Q_\Delta = 0.053Q$$

式中，Q 为相应的积分总辐射通量值；Q_Δ 为紫外总辐射通量值。

泥炭形成的水热临界指标

白光润：泥炭形成的水热系统指数．地理学报，1986，41(2)

$$T_{D_0} = 5.7K + 12.8$$

$$K_{D_0} = \frac{T-12.8}{5.7}$$

$$T_{G_0} = 5.7K + 8.65$$

$$K_{G_0} = \frac{T-8.65}{5.7}$$

式中，T 为热量指标；K 为水分指数；T_{D_0}、K_{D_0}、T_{G_0} 和 K_{G_0} 分别为低位泥炭、高位泥炭累积的水热临界指标。

大气水汽输送分析公式

张有芷：长江流域大气水汽输送．地理学报，1986，41(3)

$$Q = \frac{1}{g}\int_0^L \int_0^t \int_{P_z}^{P_s} qv\mathrm{d}p\mathrm{d}t\mathrm{d}L$$

式中，Q 为通过水平距离为 L 的大气垂直剖面的水汽总输送量；t 为时段；q 为比湿；$\boldsymbol{v}$ 为风速矢量；P_s 是地面气压；P_z 是高度 z 上的气压。

滇池温效的计算方法

张克映：昆明滇池对其周围地区温度的贡献及其特征．地理研究，1986，5(3)

$$\Delta T = T_i + \partial T_i/\partial H\mathrm{d}H - (T + \partial T_0/\partial H\mathrm{d}H + \partial T_0/\partial\varphi\mathrm{d}\varphi)$$

式中，T_i 和 T_0、$\partial T_i/\partial H\mathrm{d}H$ 和 $\partial T_0/\partial H\mathrm{d}H$ 分别为盆湖区各站与安宁盆谷区的温度值及其高度订正值。

游程转折时间与周期的平均数与方差

么枕生：应用转折点与游程的气候分析与预报．地理研究，1986，5(3)

(1) 正游程转折时间的平均数：

$$\mu^{(+)} = \frac{1}{1-p}$$

正游程转折时间的方差：

$$V_{arc}^{(+)} = \frac{p}{(1-p)^2}$$

式中，p 为湿涝年概率。

(2) 负游程转折时间的平均数：

$$\mu^{(-)} = \frac{1}{1-q}$$

负游程转折时间的方差：

$$V_{arc}^{(-)} = \frac{q}{(1-q)^2}$$

式中，q 为干旱年概率，$p+q=1$。

(3) 转折周期(干湿周期)：

1) 转折周期的平均数：

$$E[\varepsilon^*]=\frac{1}{pq}$$

2）转折周期的方差：

$$V_{arc}=\frac{p^2+q^2}{p^2q^2}$$

墙面太阳辐照的理论计算公式

朱志辉：墙面太阳辐照的理论计算与模式估计——以上海为例。地理学报，1987，42(1)

（1）墙面可能日照时间和天文辐射日总量计算：

$$T_{0t}=(\omega_{ss}-\omega_{sr})/15$$

式中，T_{0t} 为某方位倾斜面日可照时间(时角以度计量)；ω_{sr} 和 ω_{ss} 分别为墙面的日出和日没时角。

$$S_{ot}=\frac{I_0\tau}{2\pi r^2}\int_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}}(x\sin\omega+y\cos\omega-z)d\omega=$$

$$\frac{I_0\tau}{2\pi r^2}[z(\omega_{ss}-\omega_{sr})+y(\sin\omega_{ss}-\sin\omega_{sr})-$$

$$x(\cos\omega_{ss}-\cos\omega_{sr})]$$

式中 S_{ot} 为倾斜面天文辐射日总量(不考虑地形和障碍物遮蔽)；I_0 为太阳常数(1367 W·m^{-2})；r 为以天文单位表示的日地距离；τ 为日长(86400s)；ω_{sr} 和 ω_{ss} 分别为墙面的日出和日没时角；$x=\sin\alpha\sin\beta\cos\delta$，$\alpha$ 为倾斜角，β 为倾斜面或墙面的方位角(南向为0°，顺时针方向为正)，δ 为太阳赤纬；$y=(\cos\phi\cos\alpha+\sin\phi\sin\alpha\cos\beta)\cos\delta$，$\phi$ 为地理纬度(北纬为正)；$z=(\sin\phi\cos\alpha-\cos\phi\sin\alpha\cos\beta)\sin\delta$。

$$S_o=\frac{I_0\tau}{2\pi r^2}\int_{-\omega_s}^{\omega_s}(\sin\phi\sin\delta+\cos\phi\cos\delta\cos\omega)d\omega=$$

$$\frac{I_0\tau}{\pi r^2}(\cos\delta\cos\phi\sin\omega_s+\omega_s\sin\delta\sin\phi)$$

式中，S_o 为水平面天文辐射日总量；ω_s 为水平面日没时角；ω 为时角(正午为零，下午为正，上午为负)；其他参数和变量同上。

（2）墙面可照时间和天文辐射的月总量、年总量及月平均日总量计算公式：

$$S_{otm}=\sum_{n=i}^{j}S_{ot}$$

式中，S_{otm} 为墙面天文辐射月总量；n 为一年中从1月1日开始的天数(1月1日，n=1)；i 和 j 为某月的第一天和最后一天的天数(从1月1日起算)。

$$S_{oty}=\sum_{n=1}^{365}S_{ot}$$

式中，S_{oty} 为墙面天文辐射年总量。

$$\bar{S}_{ot}=\frac{1}{j-i+1}\sum_{n=i}^{j}S_{ot}$$

式中，$\bar{S}_{ot}$ 为墙面天文辐射月平均日总量。

$$T_{otm}=\sum_{n=i}^{j}T_{ot}$$

式中，T_{otm} 为墙面上每月可照时间。

$$T_{oty}=\sum_{n=1}^{365}T_{ot}$$

式中，T_{oty} 为墙面上每年可照时间。

$$\bar{T}_{ot}=\frac{1}{j-i+1}\sum_{n=i}^{j}T_{ot}$$

式中，为墙面上月平均每日可照时间。

（3）墙面直接辐射与墙面总辐射计算：

$$S_t=S\frac{S_{ot}}{S_o}$$

式中，S_t 和 S 分别代表墙面和水平面直接辐射日总量。

$$\bar{Q}_t=\bar{S}_t+\bar{D}_t+\bar{R}_t=$$

$$\bar{S}\cdot\bar{R}_b+\bar{D}(1+\cos\alpha)/2+\bar{Q}\bar{\rho}(1-\cos\alpha)/2$$

式中，$\bar{Q}_t$，$\bar{S}_t$，$\bar{D}_t$ 和 $\bar{R}_t$ 分别为倾斜面得到的总辐射、直接辐射、天空散射和地面反射的月平均日总量；$\bar{S}$，$\bar{D}$ 和 $\bar{Q}$ 分别为水平面太阳直接辐射、散射辐射和总辐射的月平均日总量；$\bar{\rho}$ 为地面反射率的月平均值；α 为倾斜角。

康拉德公式

任国玉：美国中东部温带稳定≥10 ℃积温。地理研究，1987，6(4)

$$\delta_1=30\cdot\frac{10-t_b}{t_a-t_b}+K_1$$

$$\delta_2 = 30 \cdot \frac{t_a - 10}{t_a - t_b} + K_2$$

式中，δ_1，δ_2 分别为日均温稳定出现日期和所在月份月中日之间的日数差；K_1，K_2 为经验系数。

有关辐射的计算公式

梁国昭：台湾省辐射气候特征．地理研究，1987，6(2)

(1) 地面辐射平衡方程：

$$R = Q(1-\alpha) - F$$

式中，R 为辐射平衡；Q 为总辐射；α 为地面反辐射；F 为有效辐射。

(2) 总辐射计算公式：

$$Q = Q_A(b_0 + b_1 H + b_2 N + b_3 e)$$

式中，Q_A 为天文辐射；H 为海拔高度；N 为日照百分率；e 为绝对湿度．b_0，b_1，b_2，b_3 为系数。

(3) 散射辐射计算公式：

$$D = Q\left(a - b\frac{Q}{Q_A}\right)$$

式中，a，b 为系数。

(4) 有效辐射计算公式：

$$F = \sigma T^4 (1-\varepsilon)[C + (1-C)N]$$

式中，F 为有效辐射；σ 为斯蒂芬-波兹曼常数；T 为空气温度；ε 为晴天条件下的大气辐射力；N 为日照百分数；C 为常数。

(5) 布朗特公式：

$$\varepsilon = a_1 - b_1\sqrt{e}$$

式中，e 为空气绝对湿度；a、b 为系数。

(6) 半理论公式：

$$\epsilon = 1.24(e/T)^{\frac{1}{7}}$$

太阳直接辐射光量子通量的气候学计算公式

周允华，项月琴：太阳直接辐射光量子通量的气候学计算方法。地理学报，1987，42(2)

(1) 太阳直接辐射中光合有效辐射(PAR)能量和光量子的关系：

$$n = \frac{1}{Nhc} \cdot \frac{\int_{0.4}^{0.7} \lambda S_{0\lambda} P_{\lambda,a}^{m} P_{\lambda,O_3}^{m_h} \exp(-\frac{\beta}{\lambda^\alpha} m_h) d\lambda}{\int_{0.4}^{0.7} S_{0\lambda} P_{\lambda,a}^{m} P_{\lambda,O_3}^{m_h} \exp(-\frac{\beta}{\lambda^\alpha} m_h) d\lambda}$$

式中，n 为单位 PAR 能量所具有的光量子数；c 为光速($3\times10^8 \mathrm{m \cdot s^{-1}}$)；$\lambda$ 为波长；N 为阿伏伽德罗常数(6.024×10^{23})；h 为普朗克常数($6.625\times10^{-34}\mathrm{J \cdot s}$)；$S_{0\lambda}$ 为大气外界太阳光谱辐照度；$P_{\lambda,a}$ 和 P_{λ,O_3} 分别为海平面上空气分子和 O_3 的光谱透过率；m 和 m_h 分别为绝对大气质量和相对大气质量；α 为波长指数；β 为 Angstrom 大气浑浊度系数。

(2) 利用太阳直接辐射的分光测量对 PAR 光量子数的计算：

$$n = \frac{1}{Nhc}\sum_{i=1}^{k}\overline{\lambda_i}\mu\Delta\lambda_i$$

式中，$\overline{\lambda_i}$ 为该波段的平均波长；k 为分光测量时 PAR 波段被分成的数目；其他变量和参数含义同上。

(3) PAR 光量子通量的气候学计算方法：

$$U = 4.72S\left(0.592 - \frac{0.547}{1 + 1.433S\times10^{-3}} + 0.079\lg E^*\right)$$

式中，U 为垂直于入射光线平面上的光量子通量；S 为直接辐射在全波段的积分能通量；E^* 为订正的地面水汽压。

$$U' = 4.72S'\left(0.592 - \frac{0.547}{1 + 1.433\frac{S'}{\sin h}\times10^{-3}} + 0.079\lg E^*\right)$$

式中，U' 为水平面上的光量子通量；S' 为水平面上的直接辐射通量($\mathrm{W \cdot m^{-2}}$)；h 为太阳高度。

热岛强度及其气候要素的计算公式

刘继韩：论热岛强度的表示方法。地理研究，1987，6(3)

(1) 热岛强度公式：

1) 白天：

$$\Delta T_{u-r} = 1.4 - 0.01N - 0.09u - 0.01T - 0.04e$$

2) 黑夜：

$$\Delta T_{u-r} = 2.8 - 0.10N - 0.38u - 0.02T - 0.03e$$

式中，N 为云量；u 为风速；T 为温度；e 为水汽压。

(2) 气候要素值计算公式：

$$M_{itx}=C_{itx}-L_{itx}+E_{itx}$$

式中，i 为 t 时段内的天气型，$i=1,2,3\cdots,n$；x 为城市的不同区域。

历史气候信息处理公式

陈家其：从太湖流域旱涝史料看历史气候信息处理，地理学报，1987，42(3)

(1) 弱信息处理公式：

$$D_{jl}=\frac{E_l\cdot B_{jl}}{\sum_{l=1}^{n}E_l\cdot B_{jl}}$$

式中，D 为变权系数；E 为基本权系数；B 为信息可信度；n 为站点数；l 为站点；j 为年。

(2) 信息的综合公式：

$$P_j=\sum_{l=1}^{n}(a_{jl}+C_l)\cdot D_{jl}$$

式中，P 为类型点地区等级；n 为站点数；a 为单个站点等级；l 为站点；C 为订正系数；j 为年；D 为变权系数。

黄土丘陵沟壑区小流域土壤流失量预报方程

孙立达等：西吉县黄土丘陵沟壑区小流域土壤流失量预报方程。自然资源学报，1988，3(2)

(1) $A<10\text{km}^2$ 小流域年单位面积土壤流失量最优预报方程：

$$\ln Y=-102016+94.997S^{1/40}+13.198(ER)^{1/30}-5.626\left(F/e^H\right)+0.076A-0.018L^2-0.246S_h \quad (1)$$

此方程的复相关系数 $R_1=0.847$，剩余标准差 $S_1=0.506$。

(2) $10<A<50\text{km}^2$ 小流域年单位面积土壤流失量最优预报方程：

$$\ln Y=-20.872+12.883(ER)^{1/30}-18.465(FT)+11.85S^{1/4}-5.948\left(F/e^H\right)+0.603H-0.083A+0.416L+2.822S_h \quad (2)$$

此方程式的复相关系数 $R_2=0.837$，剩余标准差 $S_2=0.483$。

以上两式中，Y 为土壤流失量；E 为年降雨侵蚀力$(100\text{J}\cdot\text{m}^{-2})$；$R$ 为年降水复合参数，等于降雨侵蚀力 E 与最大 30min 降水强度 $I_{30}(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$ 的乘积。依据西吉县 1957~1982 年的降雨资料，推求出年降雨量 $h(\text{mm})$ 与侵蚀力关系式：$E=0.19h-1.22$（相关系数 $r=0.99$），$R=1.77h-133.03$（相关系数 $r=0.85$）；S 为流域平均坡度，采用 J.B.威廉斯、H.D. 伯恩特的等高线法，在 1/50000 地形图上求得：$S=0.25Z(l_{0.25}+l_{0.5}+l_{0.75})/A$，其中，$Z$ 为流域内相对高差(km)；A 为流域面积(km^2)；$l_{0.25}$、$l_{0.5}$、$l_{0.75}$ 分别为 $0.25Z$，$0.5Z$，$0.75Z$ 处的等高线长度(km)；L 为流域长度(km)；S_h 为流域形状参数，$S_h=A/L^2$；F 为林草面积与流域面积的比值，T 为水平梯田、平台地面积与流域面积比值，H 为坡地面积与流域面积比值，以上三个为人类活动因子。

气候要素场的主成分分析

缪启龙，李兆之，龚永哲：陕西省气候的主成分分析与区划　地理研究，1988，7(2)

(1) 主成分分析：

$$X=\begin{pmatrix}x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n}\\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ x_{p1} & x_{p2} & \cdots & x_{pn}\end{pmatrix}$$

式中，n 为站点个数；p 为气候要素个数。

设存在一个新变量 Y，满足 $Y=VX$，且：

$$V=\begin{pmatrix}v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1p}\\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2p}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ v_{p1} & v_{p2} & \cdots & v_{pp}\end{pmatrix},$$

$$Y=\begin{pmatrix}y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1p}\\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2p}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ y_{p1} & y_{p2} & \cdots & y_{pp}\end{pmatrix},$$

则 Y 为 X 的线性组合；称 Y 为主要成分。

(2) 因子载荷阵：

$$A=V\Lambda^{1/2}$$

式中，$A=\begin{pmatrix}a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m}\\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ a_{p1} & a_{p2} & \cdots & a_{pm}\end{pmatrix}$，为主成分与 p 个气候要素的相关阵。

黄土高原蒸发力的计算模型

王菱等：黄土高原蒸发力的计算和应用——兼谈改善生态环境的途径．自然资源学报，1988, 3(2)

(1) 彭曼蒸发力公式为：

$$E_0 = (\delta R_n/L + rE_a)/(\delta + r)$$

式中，E_0为下垫面的蒸发力；R_n为充分湿润蒸发面的辐射平衡($J \cdot cm^{-2} \cdot d^{-1}$)；$E_a$为空气干燥力($mm \cdot d^{-1}$)；$\delta$为气温等于$T_a$时饱和水汽压对温度的斜率；$L$为蒸发潜热($J \cdot cm^{-3}$)；$r$为干湿表常数($\delta$和$r$单位为$mb \cdot °C^{-1}$)；$\delta/(r+\delta)$和$r/(r+\delta)$称为转换成水蒸气能量的"加权因子"，它们是无因次量。

(2) 对"加权因子"$\delta/(r+\delta)$和$r/(r+\delta)$的订正采用下两式：

$$\delta = \frac{de_a}{dT_a} = \frac{e_a}{273+T_a}\left(\frac{6463}{273+T_a} - 3.927\right)$$

式中，e_a为气温等于T_a时的饱和水汽压；δ仅是温度的函数。

$$r = C_P P/\varepsilon L$$

式中：C_P为干空气定压比热($J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$)，它随温度变化小，可视为常数，取值0.24；$\varepsilon$为水汽分子量对于干空气分子量的比，取值为0.622；L为蒸发潜热($J \cdot cm^{-3}$)，也近似为常数，取值为245.346；P为大气压力(mb)，随海拔高度而降低。

(3) 对辐射量的订正：

彭曼蒸发力公式中的辐射平衡项由下式确定：

$$R_n = Q_A(1-\alpha)\left(0.18+0.55\frac{n}{N}\right) - \sigma T_a^4\left(0.56-0.08\sqrt{e_d}\right)\left(0.10-0.90\frac{n}{N}\right)$$

式中，第一项为短波辐射的收入项，其经验系数只适用在一定的高度范围内，未考虑太阳辐射随高度变化，需要订正为：$(Q+q)_{oi}\left(0.248+0.752\frac{n}{N}\right)(1-\alpha)$；第二项长波辐射的收入项，其计算经度可满足地理学、农学及灌溉设计上的要求，仍按原式计算。

(4) 进行以上两项订正后的彭曼公式：

$$E_0 = \frac{\delta}{\delta+r}\frac{1}{L}\left[(Q+q)_{oi}\left(0.248+0.752\frac{n}{N}\right)(1-\alpha) - \sigma T_a^4\left(0.56-0.08\sqrt{e_d}\right)\left(0.10+0.90\frac{n}{N}\right)\right] + \frac{r}{\delta+r}\left[0.26\left(1+9.8\times10^{3}u_2\right)(e_a-e_d)\right]$$

式中：$(Q+q)_{oi}$为晴天最大辐射量($MJ \cdot m^{-2}$)；e_d为绝对湿度；e_a为饱和水汽压；(e_a-e_d)为饱和差(mb)；u_2为2m高度的平均水平风速($m \cdot d^{-1}$)；α为充分湿润条件下的蒸发面的反射率。黄土高原自然植被有林、灌木、草，反射率取值0.18

山区年、月平均温度推算公式

卢其尧：山区年、月平均温度推算方法的研究．地理学报，1988, 43(3)

$$T = T_\lambda + T_\varphi + T_h + T_g + T_m$$

式中，T为某地的实际温度；λ为经度；φ为纬度；h为海拔高度；g为除地理位置(经度和纬度)以外的其他宏观地理环境因素，主要是宏观地形(大地形)；m为除海拔高度以外的其他微观地形因素，主要是局部小地形。

山区任意地点、任意时段温(湿)度场表达公式

虞静明，詹兴伟，张宣平：山区小地形对温湿度影响的确定．地理学报，1988, 43(3)

$$T(\lambda,\varphi,h,t) = T_0(\lambda,\varphi,h,t) + \Delta T_m(t)$$

式中，$T(\lambda,\varphi,h,t)$为t时刻在经度λ、纬度φ和高度h的某测点的温(湿)度；$T_0(\lambda,\varphi,h,t)$为相同位置但不受小地形影响(或小地形相似)的温(湿)度的宏观分布值；$\Delta T_m(t)$该点的小地形订正值。

相似条件和模型雪

王中隆，潘遐华，刘贤万：路堑和隧道风雪流的风洞模拟实验研究．地理学报，1988, 43(3)

$$\phi(V,\alpha,V_*,W,d,\rho,H,g,K,L,l,h,\mu) = 0$$

式中，V为风速；α为模型走向与风向的夹角；V_*为地表摩阻速度；W为颗粒运动速度；d为粒径；ρ为空气密度；H为颗粒跳跃高度；g为重力加速度；K为地表粗糙度；L，l和h为模型尺度；μ是空气动力黏性系数。

地表蒸发过程分析公式

杨邦杰，曾德超，唐登银：裸地蒸发过程的数值模拟。地理学报，1988, 43(4)

(1) 根据地表红外温度计算裸地蒸发率：

$$E_s=(H_s-H_a)/r_c$$

式中，E_s 为地表蒸发率；$H_s(kg\cdot m^{-3})$ 是在温度为 T_s 时地表空气的绝对湿度；$H_a(kg\cdot m^{-3})$ 是高度 Z 处的空气绝对湿度；r_c 为空气动力学阻力。

(2) 根据地表能量平衡方程式计算地表温度 T_s：

$$T_s=T_1+(Z_1/\lambda_1)[R_n(T_s)-LE_s(T_s)-A(T_s)]$$

式中，T_s 为地表温度；L 为水的汽化潜热；E_s 为蒸发率；LE_s 为蒸发所消耗的能量；R_n 为净辐射；A 为加热空气的显热；Z_1 为一土层的厚度；λ_1 为土层 Z_1 的导热率；T_1 为土层 Z_1 的温度。

(3) 均质一维非饱和水运动方程：

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial Z}\left[D(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial Z}\right]-\frac{\partial K(\theta)}{\partial Z}$$

式中，$D(\theta)$，$K(\theta)$ 为非饱和土壤水扩散率与导水率；t 为时间；Z 为从地面向下的距离；θ 为地表土壤含水量。

(4) 一维瞬态的导热微分方程：

$$C\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial Z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial Z}\right)$$

式中，T 为土壤温度；C 为土壤热容量；λ 为土壤的导热率；其他变量同上。

复杂地形下非各向同性散射辐射模式

王浩：复杂地形下非各向同性散射辐射问题的研究。地理学报，1989, 44(1)

$$\frac{I_{h,\theta}}{I'}=1+g^*\cos\gamma+g^{**}(3\cos^2\gamma-1)+\cdots$$

式中，$I_{h,\theta}$ 为地面上某点来自 θ 方位和 h 高度(角)方向的散射辐射强度；I' 为各向同性假定下的散射辐射强度(与方向无关)；γ 为散射光线与太阳入射光束的夹角。参数 g^* 和 g^{**} 的计算公式为：

$$g^*=\frac{[W_1(2)-W_1(1)]\times[W_3(1)-W_3(3)]-[W_1(3)-W_1(1)]\times[W_3(1)-W_3(2)]}{[W_2(1)-W_2(2)]\times[W_1(1)-W_1(3)]-[W_2(1)-W_2(3)]\times[W_1(1)-W_3(2)]}$$

$$g^{**}=\frac{W_1(3)-W_1(1)-g^*[W_2(1)-W_2(3)]}{W_3(1)-W_3(3)}$$

式中，

$$W_1(J)=\frac{1}{F(J)}\int_0^{2\pi}d\theta\int_{h_s(J)}^{\pi/2}M\cos h dh$$

$$W_2(J)=\frac{1}{F(J)}\int_0^{2\pi}d\theta\int_{h_s(J)}^{\pi/2}NM\cos h dh$$

$$W_3(J)=\frac{1}{F(J)}\int_0^{2\pi}d\theta\int_{h_s(J)}^{\pi/2}(3N-1)M\cos h dh$$

其中，$M=\sin\alpha(J)\cos h\cos[\beta(J)-\theta]+\cos\alpha(J)\sin h$

$N=\sin h_0\sin h+\cos h_0\cos h\cos(A-\theta)$

$\alpha(1)$、$\beta(1)$、$h_s(1)$，$\alpha(2)$、$\beta(2)$、$h_s(2)$ 和 $\alpha(3)$、$\beta(3)$、$h_s(3)$ 为同一时刻、同一地区的三个不同地形，$F(1)$、$F(2)$、$F(3)$ 为相应的散射辐射通量观测值，h_0 和 A 分别为此时的太阳高度角和方位角，$J=1$，2，3。

沃尔什函数

唐佑民：应用沃尔什函数讨论我国旱涝时空变化。地理学报，1989, 44(4)

$$WAL(2j+q,\theta)=(-1)^{\left[\frac{j}{2}+1\right]}\left\{WAL\left[j,2\left(\theta+\frac{1}{4}\right)\right]+(-)^{j+q}WAL\left[j,2\left(\theta-\frac{1}{4}\right)\right]\right\}$$

式中，θ 为时间变量；$q=0$ 或 1；$j=0,1,2,\cdots$；$[j/2]$ 是指小于或等于 $j/2$ 的最大整数。

坡面辐射平衡方程及其各分量的气候计算方法

孙治安，史兵，缪启龙等：我国亚热带东部山区坡面净辐射的分布特征。地理学报，1989, 44(4)

(1) 对于坡度较小(在 20° 以下)且坡地与坡前平地地面条件大体一致的情况下，坡面辐射平衡方程可近似表达为：

$$R_{\alpha\beta}=(S_{\alpha\beta}+D_{\alpha\beta})(1-A_{\alpha\beta})-F_\alpha$$

式中，$R_{\alpha\beta}$ 为坡地净辐射；$S_{\alpha\beta}$ 为到达坡地上的太阳直接辐射；$D_{\alpha\beta}$ 为坡面上的散射辐射；$A_{\alpha\beta}$ 为坡面反射率；F_α 为坡面有效辐射。

(2) 坡面直接辐射计算：

$$\bar{S}'_{\alpha\beta}=\frac{I_0}{2\pi R^2}[U\sin\varphi(\omega_2-\omega_1)+V\cos\varphi(\sin\omega_2-\sin\omega_1)-W\cos\varphi(\cos\omega_2-\cos\omega_1)](aS_1+bS_1^2)$$

式中，α 为坡度；β 为坡向；φ 为赤纬；$U=\sin\varphi\cos\alpha-\cos\varphi\sin\alpha\cos\beta$；$V=\cos\varphi\cos\alpha+\sin\varphi\sin\alpha\cos\beta$；$W=\sin\alpha\sin\beta$；$\omega_1$ 为坡地开始日照时角；ω_2 为终止日照时角；f 为气候学透射系数；I_0 为太阳常数；

S_1 为日照百分率；a、b 为经验系数；I/R^2 为日地平均距离订正。

(3) 坡面散射辐射的计算：

$$\overline{D}_{\alpha\beta}=\overline{D}_0\cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)+F(n)A_D(h_\Theta,\alpha)\sin(A'-\beta)$$

式中，$\overline{D}_0$ 为水平面上的实际散射辐射日平均通量密度；$F(n)$ 为天空晴朗度函数；h_Θ 为正午时的太阳高度角；$A_D(h_\Theta,\alpha)=35.1\cos(1.09h_\Theta)\sin(1.42\alpha)$；$A'$ 为正午时的太阳方位角。

(4) 坡面反射率：

$$\overline{A}_{\alpha\beta}=\frac{\sum_{i=1}^{n}A_{i\alpha\beta}(S_{i\alpha\beta}+D_{i\alpha\beta})}{\sum_{i=1}^{n}(S_{i\alpha\beta}+D_{i\alpha\beta})}$$

式中 i 表示各观测时次。

(5) 坡面有效辐射：

$$F_\alpha=\overline{F}_0\cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

式中，$\overline{F}_0$ 为水平面的有效辐射日平均通量密度。

历史气候信息评价模型

葛全胜：历史文献中气候信息的评价．地理学报，1990，45(1)

$$I_Y(X)=H(X)-H(X|Y)$$

式中，$Y=(y_1,y_2,\cdots,y_n)$ 为史料中所载的气候事件；$X=(x_1,x_2,\cdots,x_m)$ 为真实的气候事件；$(y_1,\cdots,y_n)$ 和 $(x_1,\cdots,x_m)$ 对应常见的有旱涝等级 1、2、3、4、5 级或微雨、小雨、中雨、大雨、暴雨、阴天、多云、晴朗等）；$H(X)=-\sum_{i=1}^{m}P(x_i)\lg P(x_i)$ 为 X 的原熵；

$$H(X|Y)=-\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}P(y_j)P(x_i|y_j)\lg(x_i|y_j)=-\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}P(x_i,y_j)\lg\frac{P(x_i,y_j)}{P(y_j)}$$

为已知 Y 时 X 的条件熵，$P(x_i,y_j)$ 为联合概率。

$$I_Y(X)\geqslant H(X)+Q\lg Q+(1-Q)\lg\frac{1-Q}{m-1}$$

式中，$Q=1-\sum_{i=1}^{n}P(y_i)e_i$，$e_i$ 为当 Y 为 y_i 时记录错误的概率。

小流域太阳能模型

侯晖昌，钟朝章：植被工程与水土保持关系分析．水土保持通报，1990，10(1)

$$R_S=R_a\left(a+\frac{b^n}{N}\right)$$

$$R_a=\frac{I_0}{\rho_2}\frac{T_0}{\pi}(\omega_0\sin\phi\sin\delta+\sin\omega_0\cos\phi\cos\delta)$$

$$\omega_0=15\frac{N}{2}$$

$$N=\frac{4}{15}\arcsin\sqrt{\frac{\sin\frac{\alpha}{2}\sin\frac{\beta}{2}}{\cos\phi\cos\delta}}$$

式中，R_a 为大气顶太阳辐射；ω_0 为地球自转角速度；N 为理论日照时数；$\alpha=90.57+\phi-\delta$；$\beta=90.57-\phi+\delta$；ϕ 为地理纬度；δ 为赤纬，$\delta=23.5\sin(0.986\times(T_0-78.9))$；$T_0$ 为周期，一天为 1.440min；$I_0=1.96\mathrm{a\cdot l\cdot cm^{-2}}$，为太阳常数；$\rho=1+0.0165\sin(0.523T_0-1.9)$，为日地距离比值；$a$，$b$ 为与大气透明度、云量有关的系数；n 为实际日照时数。

旱涝指数公式

黄嘉佑：北京地区旱涝变化规律及其预测试验．地理学报，1990，45(1)

$$W_j=\frac{YM_j-\overline{YM}}{S_{YM}}$$

式中，W_j 为旱涝指数；$YM_j=\sum_{i=1}^{12}M_{ij}$ 为湿度指数，$M_{ij}=(R_{ij}-\overline{R}_i)/S_i$，$R_{ij}$ 表示第 i 个月第 j 年的降水量，$\overline{R}_i$ 及 S_i 分别表示 i 月份降水量序列中多年平均值及标准差；$\overline{YM}$ 和 S_{YM} 分别为年湿度序列中多年平均值和标准差。

检验样本是否突变的方法

张丕远，葛全胜：气候突变：有关概念的介绍及一例分析——我国旱涝灾情的突变．地理研究，1990，9(2)

(1) 设计一个系统量 T_y 来检验时间点前后系列是否遵从同一个分布：

$$T_y=(M_1-M_2)\Big/\left[\frac{(N_1-1)\cdot S_1^2+(N_2-1)\cdot S_2^2}{N_1+N_2-2}\times\frac{N_1+N_2}{N_1N_2}\right]^{1/2}$$

式中，y 为序列中的一个时刻；M_1，M_2 和 S_1，S_2 分别为该时刻前(N_1 个)后(N_2 个)元素的平均值和标准差。

(2) 从序列变化的平均振幅角度，定义统计量 T_y，考证 T_y 的大小来制定 y 时间点上是否存在突变：

$$T_y=(M_1-M_2)/(S_1+S_2)$$

式中，y 为时间点；M_1，M_2 和 S_1，S_2 为 y 时间点前后序列的平均值和标准差。

梯度扩散理论及 Eulerian 长度尺度模型

陈发祖：梯度扩散理论在能量和物质输送计算中的若干问题．地理研究，1990，9(2)

(1) 梯度扩散理论：

$$\tau=\bar{\rho}K_m\partial\bar{u}/\partial z$$

$$H=-\bar{\rho}C_P K_h\partial\bar{\theta}/\partial z$$

$$\lambda E=-\bar{\rho}\lambda K_W\partial\bar{q}/\partial z$$

式中，τ，H 和 λE 为相应的空气应力、热量和水汽通量；$\bar{\rho}$ 为平均空气密度；$\bar{u}$，$\bar{\theta}$，$\bar{q}$ 为平均风速、位温和比湿；C_P 为空气定压比热；λ 为水汽潜热系数；z 为高度；K_m，K_h，K_w 为动量、热量和水汽的湍流扩散系数，且：

$$K_s=ku_*(z-d)/\Phi s$$

式中，s 代表 m、h 或 w；k 是 Von Karman 常数，取值 0.4；u_* 为摩擦速度，$u_*=\sqrt{\tau/\rho}$；d 为零面位移高度；Φ 为无因次稳定度 ζ 的函数，$\zeta=(z-d)/L$，L 为 Monin-Obukhov 长。

梯度扩散理论成立条件：

$$\left|1/2l^2P_{ZZ}\right|\ll\left|lP_Z\right|$$

式中，左边为二级导数项或更高级的导数项，右边为一级导数项

(2) Eulerian 长度尺度：

$$L_u=\bar{u}\cdot\hat{T}_u=\bar{u}\cdot\int_0^\infty R_{uu}(\tau)\mathrm{d}\tau$$

式中，$R_{uu}(\tau)=\dfrac{\overline{u(t)u(t+\tau)}}{\sigma_n^2}$；$L_u$ 为 Eulerian 长度尺度；$\hat{T}_u$ 为时间尺度；$R_{uu}(\tau)$ 为自相关系数；$\bar{u}$ 为速度。

气候特点分析公式

李兆元，董亚非，吴素良等：巴山山地的气候特点．地理学报，1990，45(3)

(1) 水汽压指数：

$$e_z=e_h\cdot10^{-c(z-h)}$$

式中，e_h 为山麓 h 处水汽压；e_z 为任意海拔高度 z 处的水汽压；c 为随地区和季节而变化的参数。

(2) 降水随海拔高度变化的经验公式：

$$P_z=P_h+b[2H-z]\cdot z-(2H-h)\cdot h$$

式中，H 为最大降水高度；P_h 为在海拔高度为 h 的山麓的降水量；P_z 为任意高度 z 处的降水量；b 为决定于地区和季节的参灵敏。

山区毛竹气候生产力估算模式

霍治国：山区毛竹气候生产力模式研究．生态学报，1990，10(4)

$$y=K\cdot\sum_j f(Q)\cdot f(T)\cdot f(W)$$
$$j=1,2,\cdots,36$$

式中，$f(Q)$ 为毛竹生育过程中可接收到的太阳辐射能；$f(T)$ 为温度订正函数；$f(W)$ 为水分订正函数；K 为比例系数。

风能资源评价模型

孟昭翰，徐焕，杜慧珠：中国东南沿海风能资源评价．自然资源学报，1991，6(1)

(1) 年(月)风能的计算：

1s 内经过垂直迎风面积的风能为：

$$P=\frac{1}{2}\rho V^3F \tag{1}$$

式中，P 为 1s 内流过垂直迎风面积的风能(kW·h·m^{-2})；ρ 为空气质量密度(kg·m^{-3})；本文取 $\rho=0.125$；V 为风速(m·s^{-1})；F 为垂直迎风面积(m^2)。

风能密度为 1s 内流过单位迎风面积的风能，表示如下：

$$W=\frac{P}{F}\times9.8=4.9\rho V^3 \tag{2}$$

式中，W 为风能密度(W·m^{-2})。

对年(月)风能的计算公式：

$$E_{年(月)} = \frac{W_1t_1 - W_2t_2 + \cdots + W_nt_n}{1000} \quad (3)$$

式中，W_1，W_2,⋯，W_n 为各等级风速下风能密度（$W \cdot m^{-2}$），按照(2)式算得；t_1，t_2,⋯,t_n 为各等级风速下年(月)出现的时间(h)。

(2) 风能密度：

$$W_{年(月)} = \frac{W_1t_1 + W_2t_2 + \cdots + W_nt_n}{t_1 + t_2 + \cdots + t_n} \quad (4)$$

式中，$W_{年(月)}$ 为年（月）风能密度（$W \cdot m^{-2}$）；W_1，W_2,⋯,W_n 为各等级风速下风能密度（$W \cdot m^{-2}$），按照(2)式算得；t_1，t_2,⋯,t_n 为各等级风速下年(月)出现的时间(h)。

(3) 风速、风能的高度变化的乘幂分布：

$$\frac{V_n}{V_{10}} = \left(\frac{Z_n}{Z_{10}}\right)^{\alpha} \quad (5)$$

式中：V_{10}，Z_{10} 为10m处风速和高度；V_n，Z_n 为 nm 处风速和高度；α 为参数。

(4) 风能转换计算公式：

风力机输出电能：

$$P_e = \frac{1}{4}\pi D^2 E' \varepsilon_0 u_0 u_1 K_E = 0.7854 E' D^2 \varepsilon_0 u_0 u_1 K_E \quad (6)$$

风力机输出机械能：

$$P_m = \frac{1}{4}\pi D^2 E' \varepsilon_0 u_1 K_E \times 1.36 = 1.065 E' D^2 \varepsilon_0 u_1 K_E \quad (7)$$

低速风力机提水量：

$$Q = 288.3 E' D^2 \varepsilon_0 u_1 u_2 K K_E \frac{1}{H} \quad (8)$$

(6)~(8)式中，P_e 为电能($kW \cdot h^{-1}$)；P_m 为机械能(0.735 $kW \cdot h^{-1}$)；Q 为提水量(m^3)；D 为风机直径(m)；E' 为指定 V_Y 值下的年(月)实用有效风能($kW \cdot h^{-1}$)；ε_0 为年平均风能利用系数；u_0 为发电机效率；u_1 为风力机机械效率；u_2 为提水机械总效率(包括机械效率、容积效率、水力效率等)；K 为风力机满载系数；K_E 为空间(或塔架)高度与离地10m处的风能比值；H 为提水扬程(m)。

对于各地具体风力机不同直径、高度、扬程下的转换值，可由下列(9)~(11)式换算得到：

$$P_e = P_e' D^2 K_E \quad (9)$$

$$P_m = P_m' D^2 K_E \quad (10)$$

$$Q = Q' D^2 K_E \frac{1}{H} \quad (11)$$

式(9)~(11)中：P_e、P_m 与 Q 为转换值，分别表示欲求的年(月)输出电能($kW \cdot h^{-1}$)、机械能($0.735 kW \cdot h^{-1}$)和提水量(m^3)；P_e'、P_m' 与 Q'，为基本转换值，分别表示已知年(月)的输出电能($kW \cdot h^{-1}$)、机械能($0.735 kW \cdot h^{-1}$)和提水量(m^3)；D 和 H 分别表示欲求其输出能量的风机风轮直径(m)和提水扬程(m)；K_E 为风能比值。

风速模型

朱廷曜，孔繁智，朱劲伟等：白音他拉疏林草场气象效应的初步分析．生态学报，1991，11(1)

$$U = \frac{U_*}{\kappa} \ln \frac{Z - d}{Z_0}$$

式中，U 为 Z 高处的风速；U_* 为摩擦速度；$\kappa = 0.4$，为卡门常数；Z_0 为地面粗糙度；d 为位移高。

林带对空气的湍流交换系数影响的分析模式

王浩：林带对空气的湍流交换系数影响．地理学报，1991，46(1)

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + w\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}\left(K\frac{\partial u}{\partial z}\right) + F_{il}(u)$$

$$u\frac{\partial \theta}{\partial x} + w\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}\left(K_H\frac{\partial \theta}{\partial z}\right) + F_{il}(\theta)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

式中，u 和 w 分别为 x（x 轴沿风向)和 z（z 轴垂直于地面）方向的风速分量；θ 为空气位温；$K = l^2 S\left(1 - \frac{R_i}{R_e}\right)$ 为 z 方向动量的湍流交换系数，$R_i = \frac{g}{\theta}\frac{\partial \theta}{\partial z}/S^2$ 为 Richardson 数，$S = \left[2\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$ 为变型场的风速梯度，R_{ic} 为临界 Richardson 数(取值 0.25)；$l = \frac{k_0(z + z_0)}{1 + \frac{k_0(z - z_0)}{\lambda}}$ 为混合长度，$\lambda = 0.00027 u_g / f$，$k_0$ 为 Kaman 常数，z_0 为地面粗糙度长度，λ 为与地转参量有关的量；$K_H = \gamma K$ 为 z 方向热量的湍流交换系数，γ 为比例

系数

亚热带北界线热量综合指数计算公式

张养才，谭抗炎：中国亚热带北界及其过渡带 地理研究，1991，10(2)

$$f(T)=A\cdot f\left(\sum t\geq 10^{\circ}C\right)-B\cdot f\left(\bar{T}_1\right)-C\cdot f\left(\bar{T}_m\right)$$

式中，$f(T)$ 为亚热带北界线热量综合指数，当 $f(T)>0$ 时，为北亚热带；$f(T)<0$ 时为暖温带；$\sum t\geq 10^{\circ}C$ 为各站点10℃积温值；$\bar{T}_1$ 为最冷月平均温度；$\bar{T}_m$ 为极端低温多年平均值；A,B,C 分别为积温、最冷月平均气温和极端低温多年平均值的经验系数。

蒸发的抗阻模型及气孔阻抗计算公式

陈发祖：蒸发的抗阻模型讨论．地理研究，1991，10(2)

1. 蒸发的抗阻模型

(1) Penman 公式：

$$\lambda E_1=\frac{\varepsilon A_1+\rho\lambda\delta/r_{a1}}{\varepsilon+1+r_{s1}/r_{a1}}$$

式中，E_1 为该叶片的蒸发速率；A_1 为供给蒸发的可利用能；δ 为叶边界层外相邻空气中的饱和差，$\delta=q_s(T)-q$，q 为比湿，$q_s(T)$ 为气温 T 时的饱和比湿；λ 为水的汽化热；$\varepsilon=(\lambda/C_P)\mathrm{d}q_s/\mathrm{d}T$，$C_P$ 为空气的定压比热；r_{a1} 和 r_{s1} 为叶片的一对水汽扩散的抗阻。

(2) 蒸发的单层模式：

$$\lambda E=\frac{\varepsilon A+\rho\lambda\delta_R/r_a}{\varepsilon+1+r_s/r_a}$$

式中，r_s，r_a 为模拟的"整体"气体阻抗和"整体"边界层阻抗；A 和 E 为单位地面的可利用能和蒸发；δ_R 为冠层上某参考高度的饱和差。

(3) 蒸发的多层模型：

$$\lambda E=\frac{\varepsilon A_i+\rho\lambda\delta_i/r_{ai}}{\varepsilon+1+r_{si}/r_{ai}}$$

式中，下标 i 表示第 i 叶层；δ_i 为第 i 层的饱和差。

2. 气孔阻抗计算公式

(1) 一般计算公式：

$$r=af(s)f(V)f(T)f(C)f(W)$$

式中，r 为气孔阻抗；a 为系数；s 为太阳辐射；T 为叶温；V 为空气饱和差；C 为 CO_2 的浓度；W 为土壤水分势；f 为函数。

(2) 卢振民计算公式：

$$g_c=\{2.867I_{la}+0.0277[1-\exp(-KI_{la})]R_n/k\}\times(1-0.254D)\Big/\left\{1+[\psi_1/(-31529.0)]^{4.85}\right\}$$

$$r_s=1000/g_c$$

式中，g_c 为小麦的叶片传导度；r_s 为气体抗阻；$I_{la}=I_{la}^*/2$，I_{la}^* 为有效叶面积指数；K 为净辐射衰减系数；R_n 为净辐射；D 为饱和差；ψ_1 为叶片水分势。

(3) 蒸发对空气动力和气孔阻抗的灵敏度计算公式：

$$S_a=(r_a/E)(\mathrm{d}E/\mathrm{d}r_a)=\frac{\alpha_{eq}-\alpha}{\alpha_{pot}}$$

$$S_s=(r_s/E)(\mathrm{d}E/\mathrm{d}r_s)=\frac{\alpha}{\alpha_{pot}}-1$$

式中，S_a，S_s 分别为蒸发对空气动力和气孔阻抗的灵敏度；$\alpha=\lambda E/A$ 为标准化的蒸发值；$\alpha_{eq}=\varepsilon/(\varepsilon+1)$ 为标准化的平衡蒸发值；α 为标准化的潜在蒸发值。

扬沙能力的计算公式

贺大良，陈广庭：北京地区风沙活动的现状。地理研究，1991，10(4)

$$Y=\sum_{h=1}^{n}(|V|-V_t)^3, V>V_t$$

式中，Y 为扬沙能力；h 为时间，$h=1,2,\cdots,n$；V 为10~12m高度的实际起沙风速；V_t 为10~12m高度上的沙粒临界起动风速。

准两周振荡物频带滤波公式

巢俊民：我国七、八月等压面位势高度准两周振荡特点及其与夏季风强度和北方降水的关系。地理学报，1991，46(4)

$$y_k=a(x_k-x_{k-2})-b_1y_{k-1}-b_2y_{k-2}$$

式中，x_k 为原始时间序列；y_k 为滤波后时间序列；$a=\frac{2\Delta\Omega}{4+2\Delta\Omega+\Omega_0^2}$，$b_1=\frac{2(\Omega_0^2-4)}{4+2\Delta\Omega+\Omega_0^2}$ 和 $b_2'=\frac{4-2\Delta\Omega+\Omega_0^2}{4+2\Delta\Omega+\Omega_0^2}$ 均为系数，$\Delta\Omega=2\left|\frac{\sin\omega_1\Delta t}{1+\cos\omega_1\Delta t}-\frac{\sin\omega_2\Delta t}{1+\cos\omega_2\Delta t}\right|$，$\Omega_0^2=\frac{4\sin\omega_1\Delta t\sin\omega_2\Delta t}{(1+\cos\omega_1\Delta t)(1+\cos\omega_2\Delta t)}$，$\omega_1$ 和 ω_2 为带通滤波器中心圆频率 ω_0 两侧的两个圆频率值。

低空污染气象条件分布计算公式

史慧敏、沈觉成：南京北郊低空污染气象条件若干特征. 地理研究, 1992, 11(2)

(1) NOZAKI 公式：

$$L=\frac{121}{6}(6-P)(T-T_d)+\frac{0.168P(u_{10}+0.25)}{12f\ln(Z/Z_0)}$$

式中，L 大气混合层顶厚度；T 为气温；T_d 为露点温度；Z_0 为下垫面粗糙度；u_{10} 为 10m 高处的平均风速；P 为大气稳定度类别；f 为地转参数。

(2) 风速的铅直分布公式：

$$\frac{u_z}{u_1}=\left(\frac{Z}{Z_1}\right)^{\alpha}$$

式中，u_z, u_1 分别为高度 Z 和 Z_1 处风速；α 为经验系数。

地理要素对温度分布影响的数量评价模型

方精云：地理要素对我国温度分布影响的数量评价. 生态学报, 1992, 12(2)

(1) 订正温度模型：

$$T'=T+k_1(\overline{N}-N)+k_2(\overline{H}-H)$$

式中，T',T 为订正后及实际温度；k_1,k_2 为纬度和高度订正系数；$\overline{N}$,N 为平均纬度和实际纬度；$\overline{H}$,H 为平均高度和实际高度。

(2) 平均气温(y)模型：

$$y=a_0+a_1x_1-a_2x_2+a_3x_3$$

式中，x_1,x_2,x_3 分别为纬度、经度和海拔高度；a_0，a_1,a_2,a_3 均为系数，且 a_1,a_2,a_3 的绝对值分别表示纬度、经度和海拔高度梯度上的变化率或叫递减率。

降雨雨滴分布模型

黄炎和、卢程隆等：闽东南天然降雨雨滴特征的研究. 水土保持通报, 1992, 12(3)

$$F=1-\exp\left[-\left(\frac{d}{a}\right)^{n}\right]$$

$$a=AI^{p}$$

式中，d 为雨滴直径；F 为雨滴直径小于或等于 d 的雨滴累积体积；I 为降雨强度；n、A、p 为常数。

月平均气温计算公式

袁德辉，翁笃鸣：县级山区月平均气温推算方法. 地理研究, 1992, 11(3)

(1) 任一地点：

$$T_A=T_B+\gamma_H\Delta H+\gamma_\varphi\Delta\varphi+\gamma_\lambda\Delta\lambda+\Delta T+\varepsilon$$

式中，T_A 为任一地点的月平均温度；T_B 为某一对比站的月平均温度；ΔH，$\Delta\lambda$，$\Delta\varphi$ 分别为推算点与对比站的相对高差、纬度差和经度差；γ_H、γ_φ、γ_λ 为相应的气温直减率、气温随纬度和经度的变化率；ΔT 为小地形条件差异造成的温差项；ε 为由其他因素以及某些随机因素引起的对气温的偏差。

(2) 县级山区：

$$T_{ij}=\Delta T_{ij}+T_B=\gamma_H\Delta H+\Delta T_{\alpha\beta}+\Delta T_D+\varepsilon+T_B$$

式中，T_{ij} 为县级山区的月平均气温；$\Delta T_{\alpha\beta}$ 为由太阳辐射条件差异引起的温差；$\Delta T_D=\Delta T_{(2)}+\Delta T_{(3)}$，$\Delta T_{(2)}$ 为由夜间冷空气沉积引起的降温作用项；$\Delta T_{(3)}$ 为由入侵冷空气在沟地滞留造成的补充降温。

拉萨近地层风廓线模拟模型

曾宪宁，缪启龙，方虹：拉萨近地层风廓线模拟. 地理研究, 1992, 11(3)

(1) 莫宁-奥布赫夫相似理论：

$$\frac{\partial u}{\partial z}=u_*\cdot K^{-1}\cdot z^{-1}\cdot f_m\left(\frac{z}{L}\right)$$

式中，u_* 为摩擦速度；K 为卡门常数；L 为莫宁-奥布赫夫稳定长度；$f_m\left(\frac{z}{L}\right)$ 为经验函数。

(2) $f_m(\zeta)$ 的拟合模式：

模式一：

$$U(z)=A[\mathrm{Ln}(z\cdot z_0^{-1})-\psi_m(z)+\psi_m(z_0)]$$

式中，$U(z)$ 为 $\frac{\Delta u}{\Delta z}$ 对 z 积；$A=u_*\cdot K^{-1}$；$\psi_m(z)$ 为经验函数；z_0 为粗糙高度。

模式二：

$$U(z)=A_0x_0+A_1x_1+A_2x_2+\cdots+A_nx_n+A_{n+1}$$

式中，A_0，A_1，…，A_{n+1} 为常数。

风资源的估算公式

陈万隆：高原和开阔山地风资源的估算. 地理研究, 1992, 11(3)

(1) 近地层风速梯度计算公式：

$$\varphi_m(z/L)=(kz/u_*)\partial u/\partial z=\begin{cases}1+4.7z/L & (z/L>0)\\(1-15z/L)^{1/4} & (z/L<0)\end{cases}$$

式中，φ_m 为近地层风速梯度；k 为卡门常数；u_* 为摩擦速度；u 为平均风速；z 为高度；L 为莫宁-奥布霍夫长度尺度。

(2) 气象平均风能计算公式：

$$\overline{W}=\frac{1}{2}\overline{\rho}\int_0^{\infty}f(u)u^3\mathrm{d}u$$

式中，$\overline{W}$ 为气象平均风能；$\overline{\rho}$ 为单位时间内气流穿过的平均面积；f 为 u 的函数。

坡风热力不稳定临界瑞利数计算公式

段德寅，潘良宝：坡风热力不稳定条件的讨论．地理研究，1992，11(3)

$$R_c=\pi^4/\sin\alpha$$

式中，R_c 为坡风热力不稳定临界瑞利数；α 为山坡坡度。

气候灾害度计算公式

马乃孚，倪国裕：湖北山区气候灾害度及灾变的灰色预测．地理研究，1992，11(3)

(1) 单纯气候度：

$$D=1-\frac{1}{2}\left(\left|E-\overline{E}\right|+E'\right)$$

式中，D 为单纯气候度；E 为因子天气度；$\overline{E}$ 为因子平均天气度；E' 为因子灾害度。

(2) 实用气候度：

$$D_{\alpha}=(1+\alpha)-\frac{1}{2}\left(\left|E-\overline{E}\right|+E'\right)$$

式中，D_{α} 为实用气候度；α 为生产水平系数，$\alpha=FD/F+D$，F 为相对单产。

焚风模式

齐瑛，傅抱璞：影响大兴安岭焚风的几个因子．地理研究，1992，11(3)

(1) 三维运动方程：

$$\frac{\partial u}{\partial t}=-\theta\frac{\partial\pi}{\partial x}-fv+g\cdot\frac{z^*-\overline{S}}{\overline{S}}\frac{\partial S}{\partial x}+\frac{\overline{S}}{\overline{S}-S}\cdot\frac{\partial\left(-\overline{u'w'}\right)}{\partial z^*}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}=fu_g-fu+\frac{\overline{S}}{\overline{S}-S}\cdot\frac{\partial\left(-\overline{u'w'}\right)}{\partial z^*}$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\overline{S}}{\overline{S}-S_G}\cdot\frac{\partial\left(-\overline{\theta'w'}\right)}{\partial z^*}$$

(2) 位温方程：

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial w^*}{\partial z^*}-\frac{u}{\overline{S}-S_G}\cdot\frac{\partial S_G}{\partial x}=0$$

(3) 连续方程：

$$\frac{\partial\pi}{\partial z^*}=-\frac{\overline{S}-S_G}{\overline{S}}\cdot\frac{g}{\theta}$$

式中，

$\pi=C_P[P/10\,000]^{R/G}$，$w^*=\frac{\overline{S}}{\overline{S}-S}\cdot W+\frac{z^*-\overline{S}}{\overline{S}-S_G}\left(u\frac{\partial S_G}{\partial x}\right)$，

$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial}{\partial t}+u\frac{\partial}{\partial x}+w^*\frac{\partial}{\partial z^*}$；$\overline{S}$ 为模式顶高；S_G 为地形函数；u_g 为 x 方向地转风，带撇的量为湍流脉动量。

(4) 二阶距方程：

$$\frac{\mathrm{d}\left(\overline{u_i'u_j'}\right)}{\mathrm{d}t}=-\overline{u_i'u_R'}\frac{\partial u_j}{\partial X_k^*}-\overline{u_i'u_k'}\frac{\partial u_j}{\partial X_k^*}+\frac{g}{\theta_0}\left(\overline{u_i'\theta}\delta_{j\varepsilon}+\overline{u_j'\theta}\delta_{i\varepsilon}\right)-\frac{q}{3l_1}\frac{\partial_0}{\partial_{00}}\left(\overline{u_i'u_j'}-\delta_{ij}\cdot\frac{q^2}{3}\right)+\frac{\partial_0}{\partial_{00}}C_1\cdot q^2\left(\frac{\partial u_i}{\partial X_j^*}+\frac{\partial u_j}{\partial X_i^*}\right)-\frac{2}{3}\frac{q^3}{\lambda_1}\delta_{ij}+\frac{\partial u}{\partial X_R^*}\left[q\lambda_1\left(\frac{\partial\overline{u_i'u_j'}}{\partial X_k^*}+\frac{\partial\overline{u_i'u_k'}}{\partial X_j^*}+\frac{\partial\overline{u_j'u_k'}}{\partial X_i^*}\right)\right]$$

$$\frac{\mathrm{d}\left(\overline{\theta'u_i'}\right)}{\mathrm{d}t}=-\overline{u_i'u_k'}\frac{\partial\theta}{\partial X_k^*}-\overline{\theta'u_k'}\frac{\partial u_i}{\partial X_k^*}+\frac{q}{\theta_0}\cdot\overline{\theta'^2}-\frac{q}{3l_2}\frac{\partial_0}{\partial_{00}}\overline{u_i'\theta'}+\frac{\partial}{\partial X_R^*}\left[q\lambda_2\left(\frac{\partial\overline{u_i'\theta'}}{\partial X_k^*}+\frac{\partial\overline{u_k'\theta'}}{\partial X_i^*}\right)\right]$$

$$\frac{\mathrm{d}\left(\overline{\theta'^2}\right)}{\mathrm{d}t}=-2\overline{u_k'\theta'}\frac{\partial\theta}{\partial X_k^*}-2\cdot\frac{q}{\lambda_2}\overline{\theta'^2}+\frac{\partial}{\partial X_R^*}\left(q\lambda_3\frac{\partial\overline{\theta'^2}}{\partial X_k^*}\right)$$

式中，

$$\frac{\partial}{\partial X_i^*}=(\delta_{i1}+\delta_{i2})\frac{\partial}{\partial X_i}+$$

$$\left(\frac{z^*-\bar{S}}{\bar{S}-S_G}\cdot\frac{\partial S_G}{\partial x}\delta_{i1}+\frac{\bar{S}}{\bar{S}-S_G}\cdot\delta_{i\varepsilon}\right)\delta_{j\varepsilon}\frac{\partial}{\partial x_j}$$

$$q^2=\overline{u_1'^2}+\overline{u_2'^2}+\overline{u_3'^2}$$

式中，θ_0，α_0 为参考状态的位温和比容；α_{00} 为 α_0 的地面值；i，j，k 均可取 1，2，3；$C_1=0.056$；l 为混合长。

非静力近似小尺度数值模式

王浩，傅抱璞：干谷和湿谷边界层气候气候差异的数值模拟研究。地理研究，1992，11(3)

设 x 轴垂直于山谷方向；y 轴沿着山谷方向，z 轴为铅直方向。

$$Z_G=\begin{cases}|x+2500|\cdot\tan 11.31° & (-7500\leqslant x<-2500)\\ 0 & (-2500\leqslant x\leqslant 2500)\\ |x-2500|\cdot\tan 11.31° & (2500<x\leqslant 7500)\\ 1000 & (x>7500\text{或}x<-7500)\end{cases}$$

做坐标变换：

$$z^*=S_T\frac{Z-Z_G}{S_T-Z_G}$$

式中，S_T 为模式顶高度。

(1) 运动方程：

$$\frac{\partial u}{\partial t}=-u\frac{\partial n}{\partial x}-w^*\frac{\partial u}{\partial z^*}-\theta\frac{\partial\pi}{\partial x}+$$

$$g\frac{Z^*-S_T}{S_T}\cdot\frac{\partial Z_G}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(K_H^M\frac{\partial u}{\partial x}\right)+$$

$$f(v-v_g)-f^*w-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P_d'}{\partial x}+$$

$$\frac{\partial}{\partial z^*}\left(K_Z^M\frac{\partial u}{\partial z^*}\right)\cdot\left(\frac{S_T}{S_T-Z_c}\right)^2$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}=-u\frac{\partial v}{\partial x}-w^*\frac{\partial v}{\partial z^*}+\frac{\partial}{\partial x}\left(K_H^M\frac{\partial v}{\partial x}\right)+$$

$$\frac{\partial}{\partial z^*}\left(K_Z^M\frac{\partial v}{\partial z^*}\right)\cdot\left(\frac{S_T}{S_T-Z_c}\right)-f(u-u_g)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}=-u\frac{\partial w}{\partial x}-w^*\frac{\partial w}{\partial z^*}+f^*u-$$

$$\left(\frac{S_T}{S_T-Z_c}\right)\cdot\frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho'}{\partial z^*}+\frac{\theta'}{\theta}g+$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_Z^H\frac{\partial u}{\partial z^*}\right)\cdot\left(\frac{S_T}{S_T-Z_c}\right)$$

(2) 连续方程：

$$\frac{\partial u}{\partial x}-\frac{\partial w^*}{\partial z^*}-\frac{1}{S_T-Z_c}\cdot u\frac{\partial Z_G}{\partial x}=0$$

(3) 热力学方程：

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=-u\frac{\partial\theta}{\partial x}-w^*\frac{\partial\theta}{\partial z^*}+\frac{\partial}{\partial x}\left(K_H^H\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)+$$

$$\left(\frac{S_T}{S_T-Z_c}\right)^2\cdot\frac{\partial}{\partial z^*}\left(K_Z^H\frac{\partial\theta}{\partial z^*}\right)-$$

$$\frac{1}{C_P\rho}\cdot\frac{S_T}{S_T-Z_c}\cdot\frac{\partial R_L}{\partial z^*}$$

(4)比湿方程：

$$\frac{\partial q}{\partial t}=-u\frac{\partial q}{\partial x}-w^*\frac{\partial q}{\partial z^*}+\frac{\partial}{\partial x}\left(K_H^H\frac{\partial q}{\partial x}\right)+$$

$$\left(\frac{S_T}{S_T-Z_c}\right)^2\frac{\partial}{\partial z^*}\left(K_Z^H\frac{\partial q}{\partial z^*}\right)$$

式中，u，v，w 分别为 x，y，z 方向上的速度分量；w^* 为 z^* 上的速度分量；θ 和 q 为空气位温和空气比湿；f 和 f^* 为柯氏参数；g 为重力加速度；C_p 为定压比热；π 为压力函数；p 为大气压力；p_h 为大气的静压力；p_0 为标准气压；p^* 为气压扰动量；θ' 为位温扰动量；p_d^* 为动力压力扰动量；ρ 为空气密度；k 为空气的湍流交换系数，其中上标 M、H 分别表示动量和热量的，下标 H 和 Z 分别表示在水平方向和铅直方向。

修正的彭曼方程

陈乾，陈添宇：用 NOAA 卫星气象资料计算复杂地形下的流域蒸散，地理学报，1993，48(1)

$$E_T=CE_c$$

$$E_c=E_h+E_m$$

$$Eh=\left(\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\right)\frac{R_s}{L}$$

$$E_m=\left(\frac{\gamma}{\Delta+\gamma}\right)f(u)(e_a-e_d)$$

$$f(u)=0.152+0.163u_2$$

$$R_s=(1-\alpha_s)Q-F$$

$$Q=Q_0\left[a+(1-a)\frac{n}{N}\right]$$

$$F=\delta T_a^4(0.38258-0.11975\sqrt{W})\times\left(0.1+0.9\frac{n}{N}\right)e^{0.1Z}$$

$$\Delta = \frac{e_a}{T_a}\left(\frac{6463}{T_a} - 3.927\right)$$

$$\gamma = \frac{C_p P_s}{0.622L}$$

式中，E_T 为实际蒸散；E_c 为陆面可能蒸散；E_h 为动态平衡下的蒸发(也称热力项)；E_m 为空气动力项；$f(u)$ 为风速函数；u_s 是距地面 2m 处的平均风速($m \cdot s^{-1}$)；e_a 是饱和水汽压；R_s 为地面净辐射；α_s 为地表反照率；Q 为有云时到达地面的太阳总辐射；Q_0 为晴天时的太阳总辐射；a 为回归系数；n 为实际日照时数；N 为白昼时数；F 为有效辐射；δ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数(地面比辐射率，对 8~12μ m 窗区，雪面取 0.99，岩石区取 0.89，草甸区取 0.98)；W 为整层水汽含量；z 为海拔高度(km)；γ 为鲍恩比方程湿度计算常数；$C_p = 0.24$ 为空气定压比热；P_s 为地面气压；L 为蒸发热；T_a 为气温；C 为折算因子。

样条函数插值法

缪连桂，赵春平，欧阳宗继等：求算界限温度日期的一种新方法。地理学报，1993，48(1)

设在区间 $[a,b]$ 上有插值结点 $a \leq x_1 < x_2 < \cdots < x_n \leq b$，对应值为 $y_1, y_2, \cdots, y_n$，则二次样条函数的分段表达式为：

$$s(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)(x - x_{i-1})$$

式中，a_i，b_i 和 c_i 为待定系数；$x_i \leq x \leq x_{i+1}$。

样条函数满足条件：

插值条件：$s(x_i) = y_i$

连接条件：$s'(x_i - 0) = s'(x_i + 0)$

边界条件：$s'(x_1) = y_1'$

若取 $h_i = x_{i+1} - x_i$，则：

$$a_i = y_i$$

$$b_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{h_i}$$

$$c_1 = \left(\frac{y_2 - y_1}{h_1} - y_1'\right) / h_1$$

$$c_i = -\frac{h_{i-1}}{h_i} c_{i-1} + \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} - \frac{y_i - y_{i-1}}{h_{i-1}}\right) / h_i$$

式中，y_1' 为端点导数值，可用三点抛物插值法求得。

水汽含量模型

王炳忠，刘庚山：我国大陆大气水汽含量的计算. 地理学报，1993，48(3)

(1) *WMO* 公式：

$$W = \frac{1}{g\rho}\int_{p_0}^{p} q\,\mathrm{d}p \approx \frac{1}{g\rho}\sum_{i=1}^{n} \bar{q}_i \Delta p$$

式中，W 为水汽含量；g 为重力加速度($cm \cdot s^{-2}$)；ρ 为水的密度($g \cdot cm^{-3}$)；Δp 为层厚(hPa)；$\bar{q}_i$ 为第 i 层内的平均比湿($g \cdot kg^{-1}$)；e 为实际水汽压。

(2) Hann 公式：

$$W = ce^d$$

式中，W 为水汽含量；e 为地面水汽压；c 和 d 为待定系数。

黄河流域旱涝年夏季蒸发的计算公式

朱超群，高国栋：黄河流域旱涝年夏季蒸发计算及其变化. 地理研究，1993，12(3)

(1) 感热通量与潜热通量之比计算公式：

$$\beta = \frac{\phi_q(\zeta) C_P P \Delta T}{\phi_h(\zeta) 0.622 L \Delta e} = \frac{C_P P \Delta T}{0.622 L \Delta e}$$

式中，C_P 为空气的定压比热；P 为地面气压；L 为汽化热；ΔT 和 Δe 分别为垂直方向上的位温差和水汽压差，$\Delta e = c' \cdot e = c' \cdot e_0 \cdot 10^{-\frac{z}{a}}$，$c'$ 为经验常数，Z 为高度；$\phi_q(\zeta)$ 和 $\phi_h(\zeta)$ 分别表示无因次比湿梯度和位温梯度。

(2) 月蒸发耗热量计算公式：

$$L_e = \frac{1}{1+\beta}(R_n - G)$$

式中，L_e 为月蒸发耗热量；R_n 为净辐射量；G 为土壤热交换量。

火山喷发对辐射传输影响的数学模型

周清波：火山喷发对辐射传输影响的研究. 地理研究，1993，12(3)

(1) 平流层气溶胶粒子的尺度谱分布：

$$\frac{\mathrm{d}N(r)}{\mathrm{d}\gamma} = n(r) = Ar^a \exp\left(-br^{\gamma}\right)$$

式中，$\mathrm{d}N(r)$ 为半径 r 到 $r + \mathrm{d}\gamma$ 之间的粒子数密度；r 为粒子半径；A，a，b，γ 为参数。

(2) 粒子的消光系数计算公式：

$$\beta_e = \int_0^{\infty} Q_e \pi r^2 A r^a \exp\left(-b^{\gamma}\right) \mathrm{d}r$$

式中，β_e 为粒子的消光系数；Q_e 为消光截面。

（3）多次散射的辐射传输方程：

$$u\frac{dI(\tau,u)}{d\tau}=-\omega\int_{-1}^{+1}I(\tau,u')p(u,u')\frac{du'}{2}-I(\tau,u)-$$

$$\frac{\pi}{2}\omega S_0\exp(\tau/u_0)p(u,u')-2(1-\omega)B_\gamma(T)$$

式中，τ 为光学厚度，$\tau=\int_Z^H\beta_e dz$，H 为大气上界高度；$u=\cos\theta$，为纵标高；θ 为天顶距；$I(\tau,u)$ 是 τ 高度，对方位角的积分后沿 u 方向来的漫(散)射光强；$\omega=\frac{\beta_s}{\beta_e}$ 为散射比；$p(u,u')$ 为方位角积分后的相函数；S_0 为大气上界的太阳辐射；$\frac{B(T)}{B_\gamma(T)}$ 为温度为 T 的黑体辐射。

（4）任一高度上的净辐射差额计算公式：

$$L_i=U_i-D_i$$

式中，L_i 为任一高度上的净辐射差额；U_i、D_i 分别为整层大气中任一高度的向上、向下散射辐照度。

（5）大气变温率计算公式：

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{g}{C_P}\frac{\Delta L_i}{\Delta P}$$

式中，$\frac{\partial T}{\partial t}$ 为变温率；ΔP 为气压 P 高度上的薄层大气。

大气浑浊度系数计算公式

文军，季国良，张万程：青藏高原地区的大气浑浊度特征．地理研究，1993，12(4)

$$\tau_{d\lambda}=\beta\lambda^{-\alpha}$$

式中，$\tau_{d\lambda}$ 为气溶胶质粒的消光系数；β 为大气浑浊度系数；α 为波长指数。

（1）利用衰减公式进行迭代求解：

$$S/S_0=\left(C+0.75\cdot10^{-jm}\right)(1-i)$$

$$C=0.15-0.2\beta$$

$$f=0.075+0.65\beta$$

$$i=0.02(m+5.5-1.5\lg w)\lg w$$

式中，m 为相对大气光学质量；w 为大气中可降水量；S_0 为太阳常数；s 为到达地表的太阳直接辐射强度；β 为大气混浊度系数，且 $\beta<0.30$。

（2）利用由本文一的方法求解：

$$\bar{\tau}_m(1,mw,m\beta)=v_m(m,mw,m\beta)\cdot\bar{\tau}_m(m,mw,m\beta)$$

$$\beta=m\beta/m$$

式中，$\bar{\tau}_m(m,mw,m\beta)$ 为大气气溶胶的透射因子；m 为大气光学质量；w 为水汽含量。

互补相关蒸散发理论的计算公式

郭生练、朱英浩：互补相关蒸散发理论与应用研究．地理研究，1993，12(4)

1. 垂直方向上的热平衡方程

$$R=LE-Q+B_s$$

式中，R 为地面辐射差额；LE 为蒸散发耗能；E 为蒸散发量；L 为汽化潜热；Q 为地表与大气之间的湍流热通量；B_s 为储热量的变化。

2. 互补相关蒸散发计算公式

$$E_T+E_{TP}=2E_{TW}$$

式中，E_T 为实际蒸散发；E_{TP} 为蒸散发能力；E_{TW} 为在充分供水条件下的蒸散发量。

（1）E_{TP} 计算公式：

$$\begin{cases}E_{TP}=R_T-\lambda_p f_T(T_P-T)\\ E_{TP}=f_T(e_P-e_a)\end{cases}$$

$$R_T=(1-\alpha)G-B$$

$$G=Q(0.154+0.50n/N)$$

$$B=\varepsilon\sigma T_k^4\left(0.454-0.063\sqrt{e_a}\right)(0.1+0.9n/N)$$

式中，f_T 为水汽输送系数；λ_p 为热传导系数；e_p 为平衡温度 T_P 下的饱和水汽压；e_a 为露点温度下的饱和水汽压；R_T 为地面净辐射；α 为反射率；G、B 分别为总辐射和有效辐射；Q 为天文辐射日总量；n/N 为日照率(n，N 分别为实际、可能日照时间)；ε 为灰体辐射系数；σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数；T_k 为绝对温度；e_a 为空气水汽压。

（2）E_{TW} 计算公式：

$$E_{TW}=30.123\exp[0.0133R_{TP}/(1+\gamma p/\Delta p)]$$

式中，R_{TP} 为平衡温度条件下的净辐射；γ 为干湿表常数；Δ 为饱和水汽压曲线在 T 处的斜率；$p=P/Ps$ 为本站大气压与海平面大气压之比；Δp 为饱和水汽压曲线在平衡温度 T_P 下的斜率

焚风气候数值模拟

齐英、傅抱璞：过山气流与大兴安岭焚风. 地理学报, 1993, 48(5)

假设模式大气干燥、不可压，且满足静力平衡。则做地形坐标变换如下：

$$z^* = \bar{S} \cdot \frac{z - S}{\bar{S} - S_G}$$

式中，$\bar{S}$ 为模式顶高；S_G 为地形函数。

在地形坐标系中的二维运动方程、位温方程及连续方程分别为：

$$\frac{du}{dt} = -\theta\frac{\partial \pi}{\partial x} + fv +$$

$$g \cdot \frac{z^* - \bar{S}}{\bar{S} - S_G} \cdot \frac{\partial S_G}{\partial x} + \frac{\bar{S}}{\bar{S} - S_G} \cdot \frac{\partial\left(-\overline{u'w'}\right)}{\partial z^*}$$

$$\frac{dv}{dt} = fu_g - fu + \frac{\bar{S}}{\bar{S} - S_G} \cdot \frac{\partial\left(-\overline{v'w'}\right)}{\partial z^*}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\bar{S}}{\bar{S} - S_G} \cdot \frac{\partial\left(-\overline{\theta'w'}\right)}{\partial z^*}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} - \frac{u}{\bar{S} - S_G} \cdot \frac{\partial S_G}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial z^*} = -\frac{\bar{S} - S_G}{\bar{S}} \cdot \frac{\partial S_G}{\partial x}$$

式中，$\pi = C_p\left(\frac{P}{10^5}\right)^{\frac{R}{C_p}}$；

$$w^* = \frac{z^* - \bar{S}}{\bar{S} - S_G} \cdot \left(u \cdot \frac{\partial S_G}{\partial x}\right) + \frac{\bar{S}}{\bar{S} - S_G} \cdot w;$$

$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u\frac{\partial}{\partial t} + w^*\frac{\partial}{\partial z^*}$；$u$，$v$，$w$ 分别为风速在 x，y，z 方向上的分量；θ 为位温；π 为无量纲压力；g 为重力加速度；C_p 为定压比热；u_g 为 x 方向地旋风；带撇的量为湍流脉动量。

蒸散量计算公式

沈卫明，姚德良，李家春：阿克苏地区陆面蒸发的数值研究. 地理学报, 1993, 48(5)

(1) 可能蒸发量计算公式：

$$E_0 = \frac{\Delta \cdot R_n + \gamma \cdot E_a}{\Delta + \gamma}$$

式中，

$$E_a = f(v)(e_a - e_d);$$

$$\gamma = 0.46 \times 10^{-\frac{z}{18400(1+\alpha T_a)}};$$

$$\Delta = \frac{e_a}{273 + T_a}\left(\frac{6463}{273 + T_a} - 3.927\right);$$

E_0 为可能蒸发量(mm · d^{-1})；R_n 为净辐射；γ 为干湿表常数；z 为海拔高度；T_a 为测站气温；$\alpha = \frac{1}{273}$ 为气体膨胀系数；e_a 为饱和水汽压；e_d 为空气水汽压；v 为 10m 高处测定的风速；Δ 为温度为平均气温 T_a 时饱和水汽压的斜率。

(2) 农田实际蒸散量：

温度变化方程为：

$$\begin{cases} h_c C_c \dfrac{dT_c}{dt} = X_m \\ a\dfrac{dT_{gb}}{dt} = \dfrac{2G_b}{C \cdot \bar{d_1}} - \dfrac{2\pi}{86\,400}\left(T_{gb} - \bar{T}\right) \\ a\dfrac{dT_{gc}}{dt} = \dfrac{2G_c}{C \cdot \bar{d_1}} - \dfrac{2\pi}{86\,400}\left(T_{gc} - \bar{T}\right) \\ \dfrac{d\bar{T}}{dt} = \dfrac{\sigma_c G_c + \sigma_b G_b}{c \cdot \bar{d} \cdot \sqrt{365\pi}} \end{cases}$$

式中，T_c，T_{gb}，T_{gc} 和 $\bar{T}$ 分别为植被层、裸土层、植被下土壤表层和土壤深层温度。

由于作物的吸水速率随深度而变化，在本模式中把非饱和水分运动的根区分为二层(d_1 厚及 d_2 厚)。这两层的水分 θ_1, θ_2 的运动方程为：

$$\begin{cases} d_1\dfrac{d\theta_1}{dt} = \left(I_b - \dfrac{E_b}{\rho_w}\right)\sigma_b + \left(I_c - U_1\right)\sigma_c - q_{12} - R_{s1} \\ d_2\dfrac{d\theta_2}{dt} = q_{12} - q_{23} - U_2\sigma_c - R_{s2} \end{cases}$$

式中，I_b 和 I_c 分别为裸土及植被层下土壤表层的入渗率；U_1 和 U_2 为根系分别从表面层及底层向上的吸水速率；E_b 和 E_c 分别为裸土蒸发率和植被的蒸腾率，$E_c = \rho_w(U_1 + U_2)$；q_{12} 和 q_{23} 分别为第一、二和第二、三层之间的水分通量；R_{s1}, R_{s2} 分别为第一层及第二层中的壤中流；$\sigma_c(\sigma_b = 1 - \sigma_c)$ 为植被的覆盖率。

下垫面变化的气候效应公式

林贤超，尹思明，李克让：华北平原下垫面荒漠化和绿化对气候的影响. 地理研究，1993, 48(6)

温度和降水是两个重要的气候要素，降水与大气水汽含量又有密切的关系。在静力平衡和不可压缩的条件下，大气中的热力学方程和水汽守恒方程分别为

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho C_p T\right)+\nabla_h \cdot\left(\rho C_p \bar{V}_h T\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\rho C_p W T\right)=Q_T$$

式中，T 为空气温度；q 为比湿；Q_q 为水汽源汇项；$Q_T=-\frac{\partial h_a}{\partial z}+Lp+\frac{\partial r_a}{\partial z}$ 为大气加热率；h_a 为垂直方向的湍流热通量；p 为水汽凝结率；L 为潜热系数；r_a 为净辐射通量；其他为一般常用符号。

若 $\bar{T}_1$ 和 $\bar{T}_2$ 分别表示对应于两种性质不同下垫面的区域平衡温度，$\Delta T=\bar{T}_2-\bar{T}_1$ 为该区域由于下垫面性质变化所引起的温度变化；ΔP 为降水的变化。并假定大气中的温度随高度的变化为一线性递减关系，则：

$$\Delta T=\frac{\tau(1+\tau\lambda_1)}{C_p M(1+\tau\lambda_1)-\tau L}\left(\Delta H+\frac{\tau\lambda_1}{H\tau\lambda_1}L\Delta E+\Delta R_a\right)$$

$$\Delta P=\frac{1}{1+\tau\lambda_1}\left(\tau\lambda_1\Delta E+\lambda_2\Delta T\right)$$

式中，$\lambda_1=\frac{\partial P}{\partial W}+\frac{\partial P}{\partial r}\frac{\partial r}{\partial w}$，$\lambda_2=\frac{\partial P}{\partial r}\frac{\partial r}{\partial T}$；$M=\int_{z_0}^{z_p}\rho\,\mathrm{d}z$ 为整个大气柱的质量；τ 为有效作用时间；

$$\Delta E=\frac{\Delta R_s}{L(1+B)}-\frac{R_s\Delta B}{L(1+B)^2};$$

$$\Delta H=\frac{B(1-\tau\lambda_1)+\tau\lambda_1}{(1+\tau\lambda_1)(1-B)}\Delta R_s+\frac{R_s\Delta B}{(1+\tau\lambda_1)(1+B)^2}-\frac{\tau\lambda_1}{1+\tau\lambda_1}L\Delta E;$$

$W=\int_{z_0}^{z_p}\rho q\mathrm{d}z$ 为整个大气柱的水汽含量；R_s 为地面净辐射；s 为土壤热通量；B 为波恩比；R_a 为整个大气柱的净辐射通量。

活动积温及其持续日数变化公式

张厚瑄、张翼：中国活动积温对气候变暖的响应 地理学报，1994，49(1)

$$\Delta D_0=\frac{\Delta T_1 D}{b-\frac{1}{2}\Delta T_2}$$

$$\Delta D_{10}=\frac{\Delta T_1 D_{10}}{b-\frac{1}{2}\Delta T_2-10}$$

式中，D_0 为我国各地 > 0°C 积温的持续日数；D_{10} 为 > 10°C 积温的持续日数；ΔT_1 为当前 D_0 时期内气温增值的加权平均；ΔT_2 为增加的持续日数；ΔD_0 内气温增值的加权平均；b 为线性关系的一次项系数。

MT-CLIM 模型

Glassy J M, Running S W：通过依赖闭回的一个气候桥度，验证MT-CLIM 模型的日间气候学原理 Ecological Applications, 1994, 4(2)

$$\mathrm{esd}=0.61078\cdot\exp\frac{17.269\cdot T_{\mathrm{site}}}{237.3+T_{\mathrm{site}}}$$

式中，esd 是饱和水汽压；T_{site} 是平均日间生境温度。

$$\mathrm{es}=0.61078\cdot\exp\frac{17.269\cdot T_{\mathrm{Dew}}}{237.3+T_{\mathrm{Dew}}}$$

式中，es 是周围环境的水汽压；T_{Dew} 是露点温度。

$$RH_{\mathrm{Site}}=\frac{\mathrm{es}}{\mathrm{esd}}\times 100$$

式中，RH_{Site} 是生境日间平均相对湿度。

日间气温振幅和大气透射率之间的关系：

$$\tau_t=A\left(1-e^{-B\Delta T^{C}}\right)$$

式中，τ_t 是日间总的大气透射率；ΔT 是每天气温变化的范围；A 是天空晴朗时的最大透射率；B 和 C 是经验常数，用来确定当 ΔT 增大时，达到 τ_t 的速度。

表面的直接辐射 Is_s 通过下式计算：

$$Is_s=\cos\phi(R_0 N\tau_t{}^{AM})$$

式中，R_0 是大气层上部每月平均的太阳常数；N 是以秒计算的时间间隔；AM 是可见气团：

$$AM=\frac{1.0}{\cos\Theta}+1.0\times 10^{-7}$$

式中，$\cos\Theta$ 是天顶角的余弦。

城市边界层热岛的数值模拟方程

孙旭东、孙照伦、李兆源：西安市城市边界层热岛的数值模拟，地理研究，1994，13(2)

(1) 运动方程：

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+w\frac{\partial u}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial u}{\partial z}\right)+fv-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+k_x\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}-w\frac{\partial v}{\partial z}=$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial v}{\partial z}\right)-fv-\frac{l}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}-k_x\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$$

(2) 连续方程：

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial z}=0$$

(3) 湍流能量方程：

$$\frac{\partial E}{\partial t}+u\frac{\partial E}{\partial x}+w\frac{\partial E}{\partial z}=$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial E}{\partial z}\right)+k_g\left[\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2\right]-$$

$$\frac{g}{T}k_a\frac{\partial Q}{\partial z}-C_E\frac{E^{3/2}}{l}+k_x\frac{\partial^2 E}{\partial x^2}$$

以上方程式的边界层参数为：

$$k_L=al\sqrt{E}$$

$$l=k_0(z+z_0)/\left[1+\frac{k_0(z+z_0)}{\lambda}\right]$$

$$\lambda=\frac{27u_g\times10^{-5}}{f},$$

$$k_g=k_z=k_Q$$

$$a=0.4$$

$$C_E=a^3$$

式中，u，v，w分别为x，y，z方向的风速分量；k_Q、k_z分别为水平和垂直扩散系数；f为科氏参数；E，k_g，l，ρ分别为湍流脉动能量、湍能扩散系数、混合长度及粗糙度。

(4) 大气位温方程：

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+u\frac{\partial Q}{\partial x}+w\frac{\partial Q}{\partial z}=$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial Q}{\partial z}\right)-\frac{1}{C_P\rho}\cdot\frac{\partial F_N}{\partial z}+k_x\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2}$$

(5) 地面热量平衡方程：

$$AH+F_N+\rho C_P\cdot\frac{\partial Q}{\partial z}+k_s\rho_s c_s\cdot\frac{\partial T_s}{\partial\zeta}+LK_Z\frac{\partial Q}{\partial Z}\bigg|_{\substack{Z=0\\ \zeta=0}}=0$$

(6) 土壤热传导方程：

$$\frac{\partial T_s}{\partial t}=k_s\frac{\partial^2 T_s}{\partial\zeta^2}$$

式中，AH为地面人为热；F_N为地面长波辐射通量。

湍流无因次标准差

刘树华，张霭琛，朱廷曜等：东北林间地区廓线分布和湍流输送特征．地理学报，1994，49(2)

根据Monin-Obukhov的相似理论，在近地表层中，风速分量和温度脉动无因次标准差$\frac{\sigma_u}{u_*}$,$\frac{\sigma_v}{u_*}$,$\frac{\sigma_w}{u_*}$,$\frac{\sigma_T}{T_*}$仅为稳定参数ξ的函数，即：

$$\frac{\sigma_u}{u_*}=A(-\xi)^{\frac{1}{3}}$$

$$\frac{\sigma_v}{u_*}=B(-\xi)^{\frac{1}{3}}$$

$$\frac{\sigma_w}{u_*}=C(-\xi)^{\frac{1}{3}}$$

$$\frac{\sigma_T}{T_*}=\alpha(-\xi)^{\frac{1}{3}}$$

式中，$L=\frac{u_*^2T}{kgT_*}$，k为长曼常数，g为重力加速度；$\xi=\frac{Z}{L}$。

太阳辐射资源时空变化规律模型

彭乃志，陈玉山：宁夏太阳辐射资源时空变化规律研究。自然资源，1994，3

(1) 太阳辐射总量Q模型：

$$Q=Q_0(a+bP_s)$$

式中，Q_0为理想太阳辐射总量；P_s为日照百分率，为待定系数。

(2) 汉宁公式：

$$\begin{cases}s_o=\frac{1}{2}(s_0+s_1)\\ s_l=\frac{1}{4}\hat{s}_{l-1}+\frac{1}{2}\hat{s}_l+\frac{1}{4}\hat{s}_{l+1}\quad(1<l<m-1)\\ s_m=\frac{1}{2}(\hat{s}_{m-1}+\hat{s}_m)\end{cases}$$

式中，l为波数；$1<l<m-1$；s_l为平滑功率谱；$\hat{s}_l$为粗功率。

(3) Blackman Tukey 公式：

$$\begin{cases} s_l = \dfrac{B_l}{m}\left[r(0) + \sum r(\tau)\left(1+\cos\dfrac{\pi\tau}{m}\right)\cos\dfrac{l\pi\tau}{m}\right], \\ \qquad (l = 0,1,\cdots,m) \\ B_l = \begin{cases} 1 & (l \neq 0,\ m) \\ \dfrac{1}{2} & (l = 0,\ m) \end{cases} \\ r(\tau) = \dfrac{1}{n-\tau}\sum_{t=1}^{n-\tau}\dfrac{x_t-\bar{x}}{s}\dfrac{x_{t+\tau}-\bar{x}}{s} \end{cases}$$

式中，l 为波数；$r(\tau)$ 为样本落后自相关系数；$\tau(\tau = 0,1,\cdots,m)$ 为落后时间间隔长度；m 为最大落后时间长度；n 为样本容量；$\bar{x}$ 为样本平均值；s 为样本标准差。

纬向平均气候模式

钱永甫、黄媛媛：臭氧、云和气溶胶对纬带平均气候的影响。地理学报，1994，49(3)

根据能量平衡原理，Sellers 建立了纬向平均气候模式的基本方程：

$$R_s = L\Delta c + \Delta C + \Delta F$$

式中，R_s 是某一纬度带内的辐射平均值，即，$R_s = Q_s(1-\alpha_s) - I_s$；$Q_s$ 为到达纬带的太阳短波辐射通量密度；α_s 是行星反照率；I_s 是长波有效辐射；L 是凝结潜热；Δc 是大气中的水汽输出量；ΔC 和 ΔF 是由大气和海洋输出的感热通量密度。

风应力的整体空气动力计算公式

李克让，林贤超：大洋风应力和风场的计算公式．地理研究，1994，13(3)

$$\tau = \rho_a C_D |V| \overline{\overline{V}}$$

$$\tau_x = \rho_a C_D |V| u$$

$$\tau_y = \rho_a C_D |V| v$$

式中，τ 为风应力矢量；τ_x 和 τ_y 分别为纬向和经向风应力；ρ_a 为空气密度；C_D 为风的曳力系数；V 为风的矢量；u，v 为风的东西分量和南北分量。

感热、潜热通量的时空特征计算公式

曲维政，李若钝，孙瑞本：热带太平洋海域感热、潜热通量的时空特征．地理研究，1994，13(4)

(1) 潜热通量和感热通量的计算公式：

$$Q_K = 11.25 V_1 \Delta_1$$

$$Q_T = 7.25(t_{a1} - t_w)V_1$$

式中，Q_K、Q_T 分别为潜热、感热通量；t_{a1}、V_1、Δ_1 分别为距海面 1m 处的气温、风速、水汽压差。

(2) 风速的垂直分布公式：

$$V_z - V_1 = \lg(V_z + 1.0)\left[a(t_{az} - t_w) + b\right]$$

式中，$a = 0.19\lg z + 0.37; b = 0.81\lg E + 0.24$；$V_z$ 为距海面 z 米处的风速。

(3) 温度垂直分布公式：

在稳定层结：

$$t_{az} - t_{a1} = (0.45\lg z + 0.42)(t_{az} - t_w)^{2/3}$$

在不稳定层结：

$$t_{a1} - t_{az} = (0.46\lg z + 0.28)(t_w - t_{az})^{0.45}$$

式中，t_{az}，t_w 分别为距海面 z、w 米处的气温，z 为高度。

气象因子的统计模型

温远光，元昌安，刘世荣：广西杉木林气候生产力模型及分布的研究．自然资源，1994，6

(1) 温暖指数 WI 模型：

$$WI = \sum(t_{10} - 10)$$

(2) 湿度指数 HI 模型：

$$HI = \frac{P}{WI}$$

(3) 实际蒸散量 V 模型：

$$V = \frac{1.05P}{\sqrt{1+\left(\dfrac{1.05P}{L}\right)^2}}$$

式中，P 为年平均降水量；L 为年均最大蒸散量；t 为气温。

北半球最热坡度的解析模式

于强，傅抱璞，彭乃志等：辐射日总量的最热坡度解析模式及其全球分布规律。地理学报，1994，49(6)

(1) 冬半年($\delta < 0$)：

冬天北坡不存在最热坡度。坡度为 α 的南坡接受的天文辐射总量为：

$$Q_{a,o}=\frac{I_0E_0\tau}{\pi}[w_s\sin(\varphi-\alpha)\sin\delta+\cos(\varphi-\alpha)\cos\delta\sin w_s]$$

式中，I_0 为太阳常数；E_0 为地球轨道偏心率订正因子；τ 为日长；φ 为地理纬度；δ 为太阳赤纬；w_s 为南坡的日没时角；在冬半年，南半坡日没时角与水平面日没时角 w_o 相同，且：

$$w_o=\arccos(-\tan\varphi\tan\delta)$$

由最热坡度存在的必要条件：

$$\alpha=\varphi-\arctan\frac{w_o}{\sin w_o}\tan\delta$$

(2) 夏半年($\delta>0$)：

当 $\alpha<90°-\varphi+\delta$ 时(也就是北坡只有一次日出、日没时)：

$$\alpha=\varphi-\varphi_{01}$$

式中，φ_{01} 为水平天文日辐射总量出现最大值。

W-T 模式

卫林，王铎民，王其冬等：气候变化对我国红松林的影响．地理研究 1995，14(1)

$$Q=a+br+cr^2$$

式中，Q 为植物生产力；a、b 和 c 为参数；$r=\sqrt{\left(\frac{B\cos\theta+A\sin\theta}{m}\right)^2+(-B\sin\theta+A\cos\theta)^2}$，$A=W-W_0$，$B=T-T_0$，$T$为平均气温，$W$为年降水量，$T_0$与$W_0$为圆心坐标，$\theta$ 为坐标轴逆时针旋转角度。

冷、暖期温度的纬向谐波特征公式

曾昭美，章名立，季劲钧：近百年来全球不同冷、暖期温度分布及环流特征．地理学报，1995，50(2)

$$I_k=\frac{C_k^2}{2}\sum_{k-1}^{36/2}C_k^2$$

式中，

$$C_k=(a_k^2+b_k^2)^{\frac{1}{2}};$$

$$a_0(\varphi)=\overline{T}(\varphi)=\frac{1}{36}\sum_{\lambda=1}^{36}T(\lambda,\varphi)$$

$$b_k(\varphi)=\frac{2}{36}\sum_{\lambda=1}^{36}T(\lambda,\varphi)\sin\frac{2\pi k}{36}(\lambda-1);$$

$$T_{(\lambda,\varphi)}=a_0(\varphi)+\sum_{k-1}^{\infty}[a_k(\varphi)\cos k\lambda+b_k(\varphi)\sin k\lambda]$$

I_k 为第 k 个谐波方差与总方差之比，即第 k 个谐波的方差贡献；$T(\lambda,\varphi)$ 为某一时期纬度 φ、经度 λ 的温度距平；k 为波数；$\overline{T}(\varphi)$ 为 φ 纬带上的平均温度距平；a_k 和 b_k 分别为第 k 波的振幅系数。

EBM/BD 模式

赵凤生，石广玉：温室气体诱导的渐变气候效应．地理学报，1995，50(5)

设温室气体浓度变化引起的辐射强迫为 ΔQ，由能量守恒原理：

$$\gamma C\rho h_m\frac{d\Delta T}{dt}=\Delta Q-\lambda\Delta T-\Delta F$$

式中，ΔT 为全球地表平均气温变化；t 为时间；γ (0.72~0.75)为考虑了海洋-陆地热交换作用以后对海洋和陆地取平均的参数；C，ρ 和 h_m 分别为海水比热、密度和海洋混合层的厚度，λ 为反馈系数，ΔF 为海洋混合层向深海的热输送通量，且：

$$\Delta F=\gamma C\rho K\left.\frac{\partial\Delta T_d}{\partial z}\right|_{z=0}-\gamma C\rho k_{md}\left(\Delta T-\overline{\Delta T_d}\right)-\gamma C\rho k_{md}(\Delta T-\Delta T_b)$$

式中，k ($5361m^2\cdot a^{-1}$)和 k_{md} ($0.28m\cdot a^{-1}$)分别为海水垂直涡旋扩散系数和海水垂直对流与水平扩散引起的混合层-扩散中层和混合层-底层之间的热交换系数；ΔT_d 和 $\overline{\Delta T_d}$ 分别为海洋扩散中层的温度变化及其平均值；ΔT_b 为底层温度变化。

中层的能量平衡方程为：

$$C\rho\frac{\partial\Delta T_d}{\partial z}=C\rho K\frac{\partial^2\Delta T_d}{\partial z^2}+C\rho k_{md}(\Delta T-\Delta T_d)$$

式中，右边第一项表示涡旋扩散对海水温度变化的贡献，第二项为由高纬度地区海水垂直对流和水平扩散引起的混合层-底层之间热交换通量。

底层的能量平衡方程为：

$$C\rho\frac{\partial\Delta T_b}{\partial t}=-KC_\rho\left.\frac{\partial\Delta T_d}{\partial z}\right|_{z=h_d}+C\rho k_{md}\left(\Delta T-\Delta T_b\right)$$

式中，右边第一项表示涡旋扩散引起的中层向底层的

热输送通量，第二项为混合层-底层之间热交换通量。

划分气候类型的指标

杨持，叶波，邢铁鹏：草原区区域气候变化对物种多样性的影响．植物生态学报，1996，20(1)

$$K = \frac{r}{0.0018(25+t)(100-f)}$$

式中，t 为平均气温；r 为降水量；f 为相对湿度；K 值 >1 为湿润，K 值 1~0.6 为半湿润，K 值 0.6~0.13 为半干旱，K 值<0.13 为干旱。

交界带平均气温推算公式

施其仁，赵自胜：秦岭-黄淮平原交界带热量资源分析．自然资源，1996，1

(1) 任意地点 A 的平均气温 T_A 模型：

$$T_A = T_B + (\varphi_B - \varphi_A)\gamma_\varphi + (\lambda_B - \lambda_A)\gamma_\lambda + (h_B - h_A)\gamma_h$$

式中，T_B 为已知气象站所在地的气温；γ_φ 为该地区气温随纬度向北推移1°时气温的递减率；γ_λ 为该地区气温随经度向东增加1°时气温的递减率；γ_h 为气温随海拔高度每升高 100m 所降低的度数；φ_A，λ_A，h_A 和 φ_B，λ_B，h_B 分别为 A，B 两地的纬度、经度和海拔高度。

(2) 移置高度上的气温 T_H 模型：

$$T_H = T_B + (\varphi_B - \varphi_H)\gamma_\varphi + (\lambda_B - \lambda_H)\gamma_\lambda + \Delta T_g$$

式中，T_B 为被移置站的气温；φ_B，λ_B 和 φ_H，λ_H 分别为被移置站和移置地点的纬度、经度；γ_φ，γ_γ 分别为纬度、经度订正值；ΔT_g 为大地形订正值。

洪涝指标计算及分形结构的定义公式

周寅康：淮河流域洪涝特征初步研究．地理研究，1996，15(1)

(1) 洪涝指标计算公式：

$$I_i = P_{i1}D_1 + P_{i2}D_2$$

式中，I_i 为淮河流域年的洪涝指标；P_{i1}，P_{i2} 分别为年 1 级和 2 级面积占流域总面积的百分数；D_1，D_2 分别为 1 级和 2 级洪涝等级权重值。

(2) 分形结构定义公式：

$$N(r) = C_r^{-D} \propto_r^{-D}$$

式中，r 为量度该系统大小的尺度；$N(r)$ 为用该单位量度的结果；D 为维数；C 为常数。

整体空气动力公式

李克让，林贤超，吴忠祥：太平洋风应力平均场的特征．地理学报，1996，51(1)

$$\tau = \rho_a |v| v$$

$$\tau_x = \rho_a C_D |v| u$$

$$\tau_y = \rho_a C_D |v| v$$

式中，$\boldsymbol{\tau}$ 为风应力矢量；τ_x 和 τ_y 分别为纬向和经向风应力；ρ_a 为空气密度；$\boldsymbol{v}$ 为风矢量；
$C_D = \alpha_1 + \alpha_2(u^2+v^2)^{1/2} + \alpha_3(T_a - T_s) + \alpha_4(T_a - T_s)^2 + \alpha_6(u^2+v^2)^{1/2}(T_a - T_s)$ 为曳力系数，$\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_6$ 均为系数，$T_a - T_s$ 为大气海洋温差；u 和 v 分别为风的东西分量和南北分量。

极涡面积指数和极涡强度指数

卞林根，陆龙骅，贾朋群：南极海冰和极涡指数的时空特征及相互关系．地理学报，1996，51(1)

(1) 极涡面积指数：

$$P_{VA}(i) = R^2[1 - \sin\psi(i)]\Delta\lambda$$

式中，P_{VA} 为极涡面积指数；R 为地球半径；ψ 为特征等高线所在纬度；$\Delta\lambda$ 为计算所取经向范围。

(2) 极涡强度指数：

$$P_{VI}(i) = \rho R^2 \Delta\psi \Delta\lambda \sum_{ij} (H_0 - H_{ij}) \cos\psi(i)$$

式中，P_{VI} 为极涡强度指数；ρ 为空气密度；$\Delta\psi$ 为相邻格点的纬度差；H_0 为特征等高线值；H_{ij} 为特征等高线以南网格点的位势高度值。

宏观地面气温场气候学方程

王菱：华北山区温度推算模式和应用．自然资源学报，1996，11(2)

对平坦地区来说，一地的温度 T' 是地理纬度(ψ)、经度(λ)和高度(h)的函数，可写为 $T' = T'(\psi, \lambda, h)$，也可以简单的表达为多元一次回归方程：

$$T' = a_0 + a_1\psi + a_2\lambda + a_3 h$$

式中，a_0，a_1，a_2 与 a_3 为系数；$\psi(N°)$ 为纬度；$\lambda(E°)$ 为经度；h(100m) 为高度。

对于山区来说由于受地形影响，需要引入地形温度订正项(T_g)，温度场的气候学方程可改写为：

$$T = T(\psi, \lambda, h, g)$$

在一阶回归方程中可写为：

$$T = a_0 + a_1\psi + a_2\lambda + a_3h + T_g$$

式中，引入T_g的气候学方程，为代表山地的实际温度。

太阳辐射量变化规律模型与趋势的计算公式

童良松：我国太阳辐射量区域性变化特征研究。地理研究，1996，15(2)

(1) 太阳辐射量的变化规律模型：

$$F(n-1,n-2)=\frac{\sum_{i=1}^{2} n_i \frac{\left(\bar{x_i}-\bar{x}\right)^2}{n-1}}{\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{n_i} n_i \frac{\left(x_{ij}-\bar{x_i}\right)^2}{n-2}}$$

式中，F为统计量；n_1，n_2分别为太阳辐射年变化量两个水平(正距平和负距平)出现的次数；i为试验水平；j为每个距平值序号；x_{ij}为各水平各次距平值；$\bar{x}$为x_{ij}的总平均值；$\bar{x_i}$为第n_i组平均值。

(2) 年平均太阳辐射量拟合公式：

$$\hat{X}_i(t) = a_{io} + a_{i1}t$$

式中，$\hat{X}_i(t)$为年平均太阳辐射量；i=D、S、Q；t为时间(a)；a_{io}，a_{i1}为系数。

(3) 年平均太阳辐射量趋势变化率公式：

$$\frac{d\hat{X}_i(t)}{dt} = a_{i1}$$

干旱指数计算公式

李克让，尹思明，沙万英：中国现代干旱灾害的时空特征。地理研究，1996，15(3)

$$I_D = \frac{2D}{N}$$

式中，I_D为干旱指数；D为各类干旱等级的站数；N为总站数。

青藏高原积雪变化趋势检验的统计模式

李培基：青藏高原积雪对全球变暖的响应。地理学报，1996，51(3)

$$y_t = a + bt + E_t$$

式中，y_t为t年累积雪深的观测值；E_t为与趋势直线的偏差；a和b为统计系数。

山地降水垂直分布三参数高斯模式

俞洁，喻家龙：山地降水垂直分布三参数高斯模式及其应用。地理研究，1996，15(4)

(1) 山地降水垂直分布高斯模式：

$$P_Z = a \cdot l^{-b(Z-H)^2} + c$$

式中，P_Z为海拔的降水量；a，b，c和H为参数。

(2) 三参数高斯模式：

$$P_Z = a \cdot l^{-b(Z-H)^2}$$

气候边际效应计算公式

钟兆站，李克煌：秦岭-黄淮平原交界带气候边际效应初探　地理研究，1996，15(4)

(1) 干旱指标计算公式：

$$K = B/W_H$$

$$B = P(1-f-s)+L+W_1-E$$

式中，K为干旱指标；W_H为1m土层的最大土壤有效含水量；B为农田可供水量；P为降水量；f为径流系数；s为降水入渗系数；L为地下水补给量；W_1为时段开始的土壤有效含水量；E为实际蒸散量。

(2) 干旱月频率与海拔高度关系式：

$$y = 23.03 + 0.61H - 0.0079H^2$$

式中，y为干旱月频率；H为海拔高度。

风生流三维数值模拟

逄勇，濮培民：太湖风生流三维数值模拟试验，地理学报，1996，51(4)

(1) 基本方程：

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+\omega\frac{\partial u}{\partial z}= fv-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+A_v\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}+A_h\nabla^2 u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+\omega\frac{\partial v}{\partial z}= -fu-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+A_v\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}+A_h\nabla^2 v$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial \omega}{\partial z}=0$$

$$p = \rho_\omega g(\eta + z)$$

式中 u, v 和 w 分别为 x, y 和 z 轴方向上的流速分量；η 为垂直方向上湖面相对于平均水面的高度；ρ_ω 为水体密度；A_v、A_h 分别是垂直和水平涡动黏滞系数；f 为柯氏参数（f=7.23× $10^{-5}\cdot s^{-1}$）；g 为重力加速度；p 为水的压强项。

(2) 数值求解方案：

$$U_{i,j,k}^{n+1} = X_k - gH_k\alpha\Delta t\left(\frac{\partial \eta}{\partial x}\right)^{n+1}$$

$$U_{i,j,k}^{n+1} = Y_k - gH_k\alpha\Delta t\left(\frac{\partial \eta}{\partial y}\right)^{n+1}$$

$$\eta_{i,j,k}^{n+1} = W - \alpha^2 gH\Delta t[\beta\Delta\eta^{n+1} - (1-\beta)\Delta\eta^n]$$

式中，X_k、Y_k，W 的相对于 $n+1$ 时位面是已知的；H_k，H 分别表示每层 k 的厚度及水体总厚度；Δt 为时间步长。

坡面天文辐射总量的椭圆积分模式

孙汉群，傅抱璞：坡面天文辐射总量的椭圆积分模式。地理学报，1996, 51(6)

(1) 临界赤纬：

$$\tan^2\delta_c = \frac{\sin^2\beta\cos^2\varphi}{1-\sin^2\beta\cos^2\varphi}$$

式中，δ_c 为临界赤纬；β 为坡向；φ 为纬度。

(2) 坡面天文辐射日总量：

$$Q_d = \frac{I_0 T}{2\pi\rho^2}\int_{\omega_1}^{\omega_2}\sin h_{\alpha\beta}\mathrm{d}\omega$$

式中，I_0 为太阳常数；T 为地球自转周期；ρ 为相对日地距离；β 为坡向；α 为坡度；ω_1，ω_2 分别为坡面日出、日没时角；$h_{\alpha\beta}$ 为坡面太阳高度角；ω 为时角。

(3) 任一时段内坡面天文辐射总量：

$$Q_s = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_d \frac{T_g\rho^2}{2\pi\sqrt{1-e^2}}\mathrm{d}\lambda$$

式中，T_g 为地球公转周期；e 为地转公转轨道偏心率；λ_1、λ_2 为该时段的起、始黄经。

(4) 极昼时期内的天文辐射总量：

$$Q_c = \frac{I_0 T T_g}{2\pi\sqrt{1-e^2}}\sin x\sin\varepsilon(\cos\lambda_2 - \cos\lambda_1)$$

式中，ε 为黄赤交角；x 为一参数。

山地背风涡旋的数值模式

陈明，傅抱璞，郁绍忠：山地背风涡旋的数值研究。地理学报，1996, 51(6)

$$\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} = -\theta\frac{\partial\pi}{\partial x} + fv - g\frac{z^*-H}{H}\frac{\partial ZG}{\partial X} + Fu$$

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = -\theta\frac{\partial\pi}{\partial y} - fu + g\frac{z^*-H}{H}\frac{\partial ZG}{\partial Y} + Fv$$

$$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = F_\theta$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} = \frac{u}{H-Z_G}\frac{\partial Z_G}{\partial x} + \frac{v}{H-Z_G}\frac{\partial Z_G}{\partial y}$$

$$\frac{\partial\pi}{\partial z^*} = -\frac{g}{\theta}\frac{H-Z_G}{H}$$

式中，$F_\theta = \frac{\partial}{\partial z^*}\left(kz\frac{\partial\theta}{\partial z^*}\right)\left(\frac{H}{H-Z_G}\right)^2$；

$z^* = \frac{H(Z-Z_G)}{H-Z_G}$，$H$ 为模式顶高，Z_G 为地形高度；

$$\pi - C_p(p/p_0)^{R/C_p};$$

$$w^* = w\frac{H}{H-Z_G} + \frac{z^*-H}{H-Z_G}u\frac{\partial Z_G}{\partial x} + \frac{z^*-H}{H-Z_G}v\frac{\partial Z_G}{\partial y};$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial}{\partial t} + u\frac{\partial}{\partial x} + v\frac{\partial}{\partial y} + w^*\frac{\partial}{\partial z^*}。$$

气候变化对日极值气温及日雨量影响的分析公式

邓慧平，吴正方：气候变化对日极值气温及日雨量的影响。地理学报，1996, 51(增刊)

(1) 逐日最高气温、最低气温的模拟方法：

$$T(t) = T_s(t) + T_w(t) + T_r(t)$$

式中，$T(t)$ 表示逐日最高气温、最低气温；T_s 为季节周期项，$T_s = \bar{T} + C_1\sin(\pi t/L + \varphi_1)$，$C_1$ 和 φ_1 分别为年波振幅与位相；T_w 为冷、热波动项，其上升段的第 i 天的波动分量为：$T_W(i) = T_A + i\frac{A}{Lu}$，$i = 1,\cdots,Lu$，$Lu$ 表示从最低点上升到最高点的时间，A 表示波动的振幅，T_A 为一个波动最低点的值；下降段的波动分量为 $T_W(i) = T_B - i\frac{A'}{Lu}$、$i = 1,\cdots,Ld$，$Ld$ 表示从最高点到下一个最低点的时间，T_B 为最高点的值，A' 为该波动的降幅；T_r 为随机扰动项；t 为时间(以 d 为单位)。

(2) 逐日降水的模拟方法：

$$f(P)=\frac{\beta^{\alpha}}{P(\alpha)}(P-P_0)^{\alpha-1}e^{-\beta(P-P_0)}$$

式中，$f(P)$ 为伽玛分布函数；P_0 是起始雨量(0.2mm)，$P>P_0$；$\bar{P}=\frac{\alpha}{\beta}+P_0$ 和 $DP=\alpha/\beta^2$ 分别为日雨量平均值和方差。

逐日平均气温线性模型

吴正方，邓慧平：应用随机模拟方法评估气候变化对活动积温的影响．地理学报，1996，51(增刊)

$$T(t)=T_s(t)+T_w(t)+T_r(t)$$

式中，T 为逐日平均气温；$T_s=\bar{T}+C_1\sin(\pi t/L+Q_1)$ 为季节周期项，C_1 和 Q_1 分别为年波振幅与位相，$\bar{T}$ 为年平均气温；T_w 为冷热波动项；T_r 为随机扰动项；t 为时间变量(以 d 为单位)。

青藏高原光合有效辐射的气候学计算模式

张宪洲，张谊光，周允华：青藏高原4月--10月光合有效量子值的气候学计算．地理学报,1997，52(4)

(1) 光合有效辐照度 H_{PAR} 的计算：

$$H_{PAR}=\mu\cdot H$$

式中，H 为总辐射照度；μ 为光合有效系数，它的气候学经验公式为 $\mu=a+b\lg E^*$，且 $E^*=\frac{E\cdot P_0}{P}$，E 为地面水汽压、P 为测站气压，$P_0=1013$hpa 为标准大气压，经验系数 $a=0.390$，$b=0.035$。

(2) 光合有效量子通量密度 U_{PAR}：

$$U_{PAR}=u\cdot H_{PAR}$$

式中，u 为单位 PAR 能量所具有的量子数，被定义为量子转换系数，单位为 μmol·J^{-1}。

对青藏高原地区，可以采用 $H_{PAR}=(0.399+0.036\lg E^*)\cdot H$ 来计算光合有效辐射能量的旬平均日总量；$U_{PAR}=(1.768+0.159\lg E^*)\cdot H$ 可用来计算光合有效量子的旬平均日总量。

光合生产潜力模型

马兴祥：甘肃河西地区气候资源及其开发利用．资源科学，1998，20(3)

$$y=Q_p\cdot E(1-\alpha)(1-\beta)(1-\gamma)\times$$
$$(1-\rho)(1-\omega)\varphi\cdot C^{-1}(1-0.08)^{-1}$$

式中，Q_p 为生理辐射；E 为经济系数；α 为反射率；β 为生长季平均透射率；C 为单位干物质平均发热量。

青藏高原积雪变化的趋势分析模型

柯长青，李培基：1998，青藏高原积雪分布与变化特征．地理学报，1998，53(3)

$$b_{AR}(1)=\frac{W_{LS}b_{LS}+W_{EP}b_{EP}}{W_{LS}+W_{ER}}$$

式中，$W_{LS}=(1-\rho)^2T(T+1)$；$b_{LS}=\frac{\sum_{t=1}^{T}(t-\bar{t})y_t}{\sum_{t=1}^{T}(t-\bar{t})^2}$；$W_{EP}=6\rho[(1-\rho)(T-1)+2]$；$b_{EP}=\frac{y_T-y_1}{T-1}$；$\bar{t}=(T+1)/2$；$T$ 为时间序列的长度；ρ 为自相关系数。

大洋暖池重心计算模型

李克让，周春平，沙万英：西太平洋暖池基本特征及其对气候的影响．地理学报，1998，53(6)

$$PW_{N28X}=\frac{1}{M_n}\sum_{i=30°S}^{40°N}\sum_{j=120°E}^{130°W}j\quad(T_{ij}>28℃)$$

$$PN_{N28X}=\frac{1}{M_n}\sum_{i=30°S}^{40°N}\sum_{j=120°E}^{130°W}i\quad(T_{ij}>28℃)$$

式中，PW_{N28X} 为西太平洋暖池经向重心；PN_{N28X} 为纬向重心；M_n 为计算区间内海表温度 $SST\geq28℃$ 点的个数(以 1°×1° 的网格点数计)；$30°S\leq i\leq40°N$；$120°E\leq j\leq130°W$。

沉积环境分析的转换函数

王国，张青松，李元芳：阿拉斯加巴罗 AB-67 钻孔岩芯的沉积环境分析．地理学报，1998，53(6)

(1) 沉积速率因子的转换函数：

$$Y_1=K_1X_1+C_1$$

式中，Y_1 为沉积速率；X_1 为沉积速率因子；K_1 和 C_1 为待定常数。

(2) 海平面因子的转换函数：

$$Y_2=K_2X_2+C_2$$

式中，Y_2 为海平面高度(以海侵发生时为基准)；X_2 为海平面因子；K_2 和 C_2 为待定常数。

(3) 降水因子的转换函数：

$$Y_3 = K_3 X_3 + C_3$$

式中，Y_3 为年降水量；X_3 为降水因子；K_3 和 C_3 为待定常数。

(4) 温度因子的转换函数：

$$Y_4 = K_4 X_4 + C_4$$

式中，Y_4 为年均温度；X_4 为温度因子；K_4 和 C_4 为待定常数。

海域年海表温度值与年热带气旋频数的统计关系

杨桂山，施雅风：西北太平洋热带气旋频数的变化及与海表温度的相关研究．地理学报，1999，54(1)

$$P = ae^{b(S_{ST}-26)}$$

式中，a 和 b 为统计系数。

对等辐照方位与建筑朝向的选择模型

朴汉群，傅抱璞：对等辐照方位与建筑朝向的选择。地理学报，1999，54(1)

(1) 墙面日照时间和天文辐射日总量计算公式：

当 $|\beta|<|\beta_1|$ 时：

$$T_s = \begin{cases} E\cdot(2\omega_0) & (\delta \leqslant 0) \\ E\cdot(2\omega_x) & (\delta > 0) \end{cases}$$

$$Q_s = \begin{cases} F\cdot(\omega_0 \sin\delta \sin x + \cos\delta \cos x \sin\omega_0 \cos\omega_m) & (\delta \leqslant 0) \\ F\cdot(\omega_x \sin x \sin\delta + \cos x \cos\delta \sin\omega_x) & (\delta > 0) \end{cases}$$

当 $|\beta|>|\beta_2|$ 时：

$$T_s = \begin{cases} \begin{cases} E(2\omega_x) & (\alpha \leqslant \alpha_c) \\ 0 & (\alpha > \alpha_c) \end{cases} & (\delta \leqslant 0) \\ \begin{cases} E(2\omega_0) & (\alpha \leqslant \alpha_c) \\ E(2\omega_0 + 2\omega_x - 2\pi) & (\alpha > \alpha_c) \end{cases} & (\delta > 0) \end{cases}$$

$$Q_s = \begin{cases} \begin{cases} F(\omega_x \sin\delta \sin x + \cos\delta \cos x \sin\omega_x) & (\alpha \leqslant \alpha_c) \\ 0 & (\alpha > \alpha_c) \end{cases} & (\delta \leqslant 0) \\ \begin{cases} F(\omega_0 \sin x \sin\delta + \cos x \cos\delta \sin\omega_0 \cos\omega_m) & (\alpha \leqslant \alpha_c) \\ F[(\omega_x + \omega_0 - \pi)\sin x \sin\delta + A] & (\alpha > \alpha_c) \end{cases} & (\delta > 0) \end{cases}$$

当 $|\beta_1|<\beta<|\beta_2|$ 时：

$$T_s = E(\omega_0 + \omega_x - |\omega_m|)$$

$$Q_s = \frac{F}{2}\{(\omega_0 + \omega_x - |\omega_m|)\sin x \sin\delta + [\sin(\omega_0 - |\omega_m|) - \sin\omega_x]\cos x \cos\delta\}$$

式中，$A = \cos x \cos\delta(\sin\omega_x + \sin\omega_0 \cos\omega_m)$ T_s 为可照时间；Q_S 为天文辐射日总量；$E = 12/\pi$ (h)；$F = I_0 T/\pi\rho^2$；I_0 为太阳常数；T 为地球自转周期；ρ 为相对日地距离；而 x，ω_m，ω_x 是三个参数(可根据纬度 φ、坡度 α 和坡向 β 确定)；ω_0 为水平面上的日没时角；ω_{s1}，ω_{s2} 分别为坡面所在的非水平面上的日出日没时角。

(2) 对等日照方位计算公式：

$$\cos\beta = \tan\varphi$$

(3) 对等辐射方位的计算公式：

$$\tan|\beta| = \frac{\cos^2\varphi}{\sin\varphi} Y_\varphi$$

式中，Y_φ 为方程 $y + \tan^2\varphi \tan y = 0$ 的一个有意义的解。

西伯利亚高压强度指数的计算模型

龚道溢，王绍武：西伯利亚高压的长期变化及全球变暖可能影响的研究。地理学报 1999，54(2)

$$I = \frac{\sum_{n=1}^{72} P_n \delta_n \cos\phi_n}{\sum_{n=1}^{72} \delta_n \cos\phi_n}$$

式中，P_n 是某一格点的海平面气压值；ϕ_n 是格点的纬度；δ_n 为反映研究区内高压中心平均单位面积大气柱中堆积的大气质量多少的指数(当 $P_n > 1028$hPa 时，取 $\delta_n = 1$；当 $P_n < 1028$hPa 时，取 $\delta_n = 0$)。

光能利用率模型

蔡虹，刘金铜，王建江：太行山低山丘陵区牧草引种的气候生态适应性研究。生态学杂志，1999，18(2)

$$E = \frac{M\cdot H}{\sum Q} \times 100\%$$

式中，M 为干物质增量；H 为物质燃烧值；$\sum Q$ 为生育期内辐射总量。

泥炭形成的界限气候指标

白光润，王升忠，冷雪天等：草本泥炭形成的生物环境机制．地理学报，1999，54(3)

$$V = (S - 56\%) / T > 0.00928$$

式中，V 为泥炭形成气候的湿热比；S 为> 0℃期间多年平均相对湿度；T 为> 0℃期间多年平均气温。

月平均地表反照率

张琼、钱永甫：用NCEP/NCAR再分析辐射资料估算月平均地表反照率。地理学报，1999，54(4)

$$\alpha = \frac{\overline{R}}{\overline{Q}} \times 100\%$$

$$\overline{\alpha}_{m} = (\alpha - a) / b$$

式中，α 为月平均地表反照率；$\overline{Q}$和$\overline{R}$ 分别为总辐射和反射辐射的月平均辐射通量；a 和 b 是与太阳天顶角有关的系数；$\overline{\alpha}_{m}$ 为修正的月平均地表反照率。

大地/大气界面传输的 GSVAT 模型

莫兴国，林忠辉，刘苏峡：用GSVAT模型研究大地/大气界面传输。生态学报，1999，19(6)

(1) 冠层、地表辐射收支模型：

$$R_{nc} = (1-\alpha_c)Q_t - \eta_s(1-\alpha_g)Q_t + (1-\eta_l)\varepsilon_c L^{\downarrow} - 2\varepsilon_c\sigma T_c^4 + (1-\eta_l)\varepsilon_g\sigma T_g^4$$

$$R_{ng} = \eta_s(1-\alpha_g)Q_t + \eta_l\varepsilon_g L^{\downarrow} + \varepsilon_g\varepsilon_c\sigma T_c^4 - \varepsilon_g\sigma T_g^4$$

式中，R_{nc}、R_{ng} 分别为冠层和地表吸收的净辐射；Q_t 为到达冠层顶的太阳短波辐射；$L^{\downarrow}$ 为大气逆辐射；α_c 为冠层反射率；α_g 为地表反射率；ε_g、ε_c 分别为土壤和冠层植物体比辐射率；η_s、η_l 分别为冠层短波辐射和长波辐射透过率；T_c、T_g 分别为冠层温度和地表温度；σ 为 Boltman 常数。

(2) 总的潜热 LE、感热通量 H 模型：

$$LE = \frac{\rho C_p}{\gamma} \frac{e_0 - e_a}{r_a}$$

$$H = \rho C_p \frac{T_0 - T_a}{r_a}$$

式中，L 为汽化潜热；ρ 为空气密度；C_p 为空气定压比热；e_a、T_a 分别为参考高度的水汽压和气温；e_0、T_0 分别为冠层源汇高度的水汽压和气温；r_a 为水汽、热量的传输阻力。

(3) 非饱和-饱和土壤水热运动模型：

$$C_\Psi \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(K_w \frac{\partial \Psi}{\partial tz} + K_w\right) + S_u$$

$$C_m \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda \frac{\partial T_s}{\partial tz}$$

式中，C_Ψ 为土壤水容；Ψ 为土壤水势；K_w 为土壤水分传导率；S_u 为作物根系吸水函数；C_m 为土壤热容量。

SST 温度计模型

何学贤，彭子成，王兆荣等：利用珊瑚的影像密度恢复南海海表温度。地理学报，2000，55(2)

(1) 生长率温度计模型：

$$S_{ST} = 0.1175 \times L - 26 \quad (r = 0.91)$$

式中，S_{ST} 是各年的年平均表面海水水温(℃)；L 是各年的生长率($mm \cdot a^{-1}$)；r 为相关系数。

(2) 钙化率代用指标温度计模型：

$$S_{ST} = 0.0204 \times G' - 26 \quad (r = 0.85)$$

式中，S_{ST} 是各年的年平均海水水温(℃)；G' 是各年的钙化率代用指标；r 为相关系数。

未来气候变化对中国东北地区水热条件影响的数值模拟模型

吴金栋，王石立，张建敏：未来气候变化对中国东北地区水热条件影响的数值模拟研究。资源科学，2000，22(6)

(1) k 作物生育期内的需水量 E_{rk} 模型：

$$E_{rk} = \sum_{j=1}^{m} kc_{k,j} EO_{k,j}$$

式中，$kc_{k,j}$,$EO_{k,j}$ 分别为 k 作物第 j 个发育期的作物系数和参照蒸散；k =1,2,3 分别为春小麦、春玉米和一季稻；m 为该作物的总发育期个数。

(2) k 作物缺水量 E_{Sk} 模型：

$$E_{Sk} = E_{rk} - P_{ek}$$

$$P_{ek} = \mu_k \sum_{j=1}^{m} \sum_{i=1}^{n_j} P_i$$

式中，μ_k 为 k 作物降水有效利用系数；n_j 为 j 发育期的天数；P_i 为第 i 天降水量。

(3) 月降水的年际变率与逐日降水特征(晴雨状态及降水量)关系模型：

$$Var(P_k) \approx N_k \pi_k \alpha_k \beta_k^2 \left[1 + \alpha_k (1-\pi_k) \frac{1+d_k}{1-d_k}\right]$$

式中，$Var(P_k)$ 为k月降雨量方差；π_k、d_k、α_k、β_k 分别为k月雨日频率参数、降水持续参数、形状参数和尺度参数；N_k 为序列长度。

采暖耗能公式

陈峪等：气候变化对能源需求的影响．自然资源学报，2000，55(supplement)

多年平均采暖耗能可用下式表示：

$$\bar{E} = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n} E_i$$

式中，E_i 为第i年采暖耗能 $(i = 1,2,\cdots,n)$

$$E_i = \sum_{i=1}^{l_i} e_{ij} l_i$$

式中，e_{ij} 为i年j月的采暖耗能，l_i 为年采暖长度(d)。

气候异常对策集成评价模型

王守荣：气候异常对策集成评价模型研究．自然资源学报，2000，55(supplement)

1．费用模块

总费用计算公式为：

$$C = C_d + C_i \tag{1}$$

式中，C，C_d 和 C_i 非别表示总费用、直接费用、间接费用。

直接费用计算公式为：

$$C_d = \sum C_{pi} + \sum C_{I\,j} + \sum C_{Tl} + \sum C_{M_k} + \sum C_{O_n} \tag{2}$$

式中，C_p 为前期费用；C_I 为工程费用；C_T 为技术费用；C_M 为运行费用；C_O 为其他费用。

间接费用计算公式为：

$$C_i = \sum C_{Li} + \sum C_{W\,j} + \sum C_{Fl} + \sum C_{G_m} + \sum C_{A_n} \tag{3}$$

式中，C_L 为土地损益；C_W 为水资源损益；C_F 为森林损益；C_G 为产值损益；C_A 为其他损益。间接费用中的各种损益很难精确计算，可用下列方法进行估算：

(1) 防护费用法：

$$E(Y_i) = a + \sum_{j=1}^{K} \beta_j X_j \tag{4}$$

式中，$E(Y_i)$ 为期望费用，K 为设施数，X_j 为防护设施，β_j 为价格，a 为常数。防护费用法的含义，使用防止各种损失的发生所投入的设施费，来估算方案对社会、生态环境造成的损失

(2) 恢复费用法：

$$E(C_r) = a + \sum_{i=1}^{m} P_i Q_i \tag{5}$$

式中，$E(C_r)$ 为期望费用；m 为设施或工程数；Q_i 为恢复设施或恢复工程；P_i 为设施价格或工程造价，a 为常数。恢复费用的含义，要用消除方案负面影响所投入的设施或兴修的工程造价，来估算项目对社会、生态环境造成的损失。

2．效益模块

效益计算公式为：

$$B = B_d + B_i \tag{6}$$

式中，B 为总效益；B_d 为直接经济效益；B_i 为间接经济效益。

直接效益计算公式为：

$$B_d = \sum B_{C_i} + \sum B_{G_j} + \sum B_{F_k} + \sum B_{H_l} \tag{7}$$

式中，B_C 为灾害损失减小额；B_G 为产值增加额，B_F 为设施保护额；B_H 为其他效益。

$$B_i = \sum B_{R_i} + \sum B_{E_j} + \sum B_{P_l} + \sum B_{M_n} + \sum B_{O_m} \tag{8}$$

式中，B_R 为资源增量；B_E 为环境改善；B_P 为伤亡减少；B_M 为移民减少；B_O 为其他效益。

间接经济效益中的各项收益也很难精确计算，可用下列方法进行估算：

(1) 市场价值法：

$$E_B = \sum_{i=1}^{k} \frac{P_{i1} + P_{i2}}{2} \Delta Q_i \tag{9}$$

式中，E_B 为期望效益；k 为产品种类；P_{i1} 为第i种产品增加产量前价格；P_{i2} 为第i种产品增加产量后的价格；Q 为产品数量。市场价值法的含义，是用对策方案导致产品数量的增加，来计算项目的间接效益。

(2) 替代市场法：

$$\Delta V = \sum_{j=1}^{m} P_i (q_{i2} - q_{i1}) \tag{10}$$

式中，ΔV 为等效价值；m 为产品种类；P_i 为第i种产品价格；q_{i2} 为第i种产品预期单位质量；q_{i1} 为第i种产品现行单位质量。

替代市场法的含义，是对策方案的实施促进产品质量的提高，从而导致价值的提高亦即效益的提高：

$$E_B = \Delta V \cdot Q \quad (11)$$

(3) 人力资本法：

$$L = mY\Delta T_1 + nY\Delta T_2 = Y(m\Delta T_1 + n\Delta T_2) \quad (12)$$

式中，L 为人力资本；m 为减少受伤人数；n 为减少死亡人数；Y 为人均收入；ΔT_1 为平均养伤年份；ΔT_2 为人均寿命的半数

3. 费用-效益评价模块

净效益(经济净现值)：

$$P_s = B_s - C_s \quad (13)$$

式中，P_s 为净效益；B_s 为总效益；C_s 为总费用。效益费用比(投资净效益率)：

$$R_s = B_s / C_s \quad (14)$$

式中，R_s 为效益费用比。

内部效益率(经济内部收益率)：

$$r = i_1 + \frac{|P_1|}{|P_1| + |P_2|}(i_2 - i_1) \quad (15)$$

式中，r 为内部效益率；i 为社会贴现率；P 为收益现值。

4. 社会、生态环境影响预测模块

对社会、生态损益指标可用下列方法估算：

回归预测方法：

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \cdots + b_nx_n \quad (16)$$

式中，y 为预测量；x 为自变量；a、b 为系数。

时间序列法：

$$S_t' = \alpha y_t + \alpha(1-\alpha)y_{t-1} + \alpha(1-\alpha)^2 y_{t-2} + \cdots \quad (0 < \alpha < 1) \quad (17)$$

式中，S_t' 为预测量；y_t 为 t 年已知量；α 为系数。

交叉影响预测法：

$$P_n' = P_n + KP_n(1 - P_n) \quad (18)$$

式中，P_n 为事件 D_m 发生前 D_n 的概率；P_n' 为事件 D_m 发生后 D_n 的概率；D_m 对 D_n 的影响为 K。

5. 不确定性分析模块

敏感性分析：

$$\Delta B_s = \Delta f(x_i) \quad (19)$$

式中，ΔB_s 为收益变化，$\Delta f(x_i)$ 为自变量变化。

风险分析：

$$\Delta B_p = \sum P_i N_i \quad (20)$$

式中，ΔB_p 为收益变化；N_i 为自然或人为灾害造成的损失；P_i 为灾害发生概率。

6. 专家评审模块

根据对策方案评价指标体系 $j(j = 1,2,\cdots,k)$ 和评语等级 $V_i(i = 1,2,\cdots,n)$，通过专家定量与定性评判，得单因素评判矩阵：

$$R = \begin{bmatrix} R1 \\ \vdots \\ R_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{j1} & r_{j2} & \cdots & r_{jn} \end{bmatrix} \quad (21)$$

用层次分析法确定各指标权重：

$$W = (W_1, W_2, \cdots, W_j) \quad (22)$$

则方案综合评判结果为：

$$B = W \cdot R = (b_1, b_2, \cdots, b_n) \quad (23)$$

对所得结果进行归一化处理，对 b_i 以相对值表示，使 $\sum_{i=1}^{n} b_i = 1.0$。取 $b^* = \max(b_1, b_2, \cdots, b_n)$，则得到对应的评语等级 V_i。

7. 方案筛选模块

设项目有 l 各方案可供筛选($l = 1,2,\cdots,m$)。根据上述方法，可得到方案的评判结果：

$$\underline{B(l)} = \underline{W_l} \cdot \underline{R_l} = (b_1, b_2, \cdots, b_m) \quad (24)$$

将各方案评判结果组成矩阵：

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} B_1 \\ \vdots \\ B_l \\ \vdots \\ B_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1^{(1)} & b_2^{(1)} & \cdots & b_i^{(1)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_1^{(l)} & b_2^{(l)} & \cdots & b_i^{(l)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_1^{(m)} & b_2^{(m)} & \cdots & b_i^{(m)} \end{bmatrix} \quad (25)$$

从各方案的 $\underline{B}$ 中选取最大值，以此进行方案间的选优排序，供有关决策部门参考。

气候异常直接经济损失预测模型

王守荣：我国气候异常直接经济损失预测模型．地理学报,2000, 55(supplement)

构建气候异常直接经济损失预测模型框架如下：

$$Z(t) = T(t)P(t)S(t) \quad (1)$$

式中，$Z(t)$ 为直接经济损失；$T(t)$ 为时间趋势项；$P(t)$ 为气候异常影响项；$S(t)$ 为随机波动项。

取上式直接经济损失的对数值作为被解释变量，直接将气候异常直接经济损失预测模型设定为下列形式：

$$\ln(Z_t) = a + b(S_{AAO}/G_{DPPI}) + cD_i + dT_i \quad (2)$$

式中，$i=1,2,\cdots,5$，T_i 为时间变量；a，b，c 和 d 为系数。

热带气旋灾情的隶属函数模型

樊琦，梁必骐：热带气旋灾情的预测及评估. 自然资源学报，2000，55(supplement)

(1) 隶属函数模型：

$$U_i(x) = \begin{cases} 0 & (x \leqslant c) \\ \dfrac{1}{1+[a(x-c)]^b} & (x > c) \end{cases}$$

式中，$U_i(x)$ 为因素 x 的隶属函数；a，b 和 c 为参数，且 $a>0$，$b<0$，$c>0$；在解析式中，规定数值如下：$b=-2$，$c=x_{\min}$，另历年最大灾情统计数据所对应的隶属度值为 0.99，则有：

$0.99=\dfrac{1}{1+[a(x_{\max}-c)]^{-2}}$，即 $a=\dfrac{\sqrt{99}}{x_{\max}-x_{\min}}$，经过多次计算，在灾前预测模型 $\alpha=\dfrac{\sqrt{99}}{x_{\max}-x_{\min}}K$ 中的 K 取值为 0.4。

(2) 设影响热带气旋灾害的因子为 n 个，每一个因子的评价集为：$Ri=(ri1,ri2,\cdots,rim), i=1,2,\cdots,n$，则由 n 个灾情因子得到的总评价矩阵为：

$$R=\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据各灾情因子在成灾过程中的相对影响大小，可以建立各因子的权重分配，记为：$A=(a_1,a_2,\cdots,a_n)$，$\alpha_i \geqslant 0$，$i=1,2,\cdots,n$，且 $\sum_1^n \alpha_i = 1$。

(3) 各热带气旋灾情的综合指数：

$$b_j=\sum a_i r_{ij} \quad (j=1,2,\cdots,m)$$

气候突变的 Yamamoto 法和 Mann-Kendall 法

闫敏华等：大面积开荒扰动下的三江平原近 45 年气候变化. 地理学报，2001，56(2)

(1) Yamamoto 法：这种方法是用来检验两随机样本平均值的显著差异。设定一个基准年，设置基准年的信噪比 S/N 为：

$$S/N=\frac{|\bar{x}_1+\bar{x}_2|}{s_1+s_2}$$

式中，$\bar{x}_1$ 和 $\bar{x}_2$，s_1 和 s_2 以及 n_1 和 n_2 分别代表一连续的随机变量 x 基准年以前时段和基准年以后时段的 2 个子样本集 x_1 和 x_2 的平均值、方差和时段长度，n_1 和 n_2 根据需要可人为地设定；把 $S/N>1.0$ 确定为突变，$S/N>2.0$ 确定为强突变，该方法把突变出现的时间定在数年宽度的范围。在可用资料的全部时段内，连续设置基准年，从而得到 S/N 的时间序列。当 $n_1=n_2=10$ 时，$S/N>1.0$，则达到 95%以上的信度水平；当 $n_1=n_2=14$ 时，$S/N>1.0$，则达到 99.95%以上的信度水平。

(2) Mann-Kendall 法：原假设 H_0：气候序列平稳且随机独立，其概率分布相同。设此气候序列为：$x_1,x_2,\cdots,x_n$，m_i 表示序列中第 i 个样本 x_i 大于 x_j $(1\leqslant j\leqslant i)$ 的累计数。

定义一个统计量：

$$d_k=\sum_{i=1}^{k} m_i \qquad (2\leqslant k\leqslant N)$$

如果在原序列平稳且随机独立的假定下，d_k 的均质、方差分别为：

$$\begin{cases} E[d_k]=k(k-1)/4 \\ V_{AR}[d_k]=k(k-1)(2k+5)/72 \end{cases} \qquad (2\leqslant k\leqslant N)$$

如果将 d_k 标准化，则有：

$$u(d_k)=(d_k-E[d_k])/(V_{AR}[d_k])^{1/2}$$

式中，$u(d_k)$ 为标准分布，其概率 $\alpha_1=p_{rob}(|u|>|(d_k)|)$ 可以通过计算或查表获得。给一定的显著性水平 α_0，当 $\alpha_1>\alpha_0$ 时，接受原假设 H_0，它表示此序列将存在一个强的增长或减少趋势。设 $u(d_k)=0$，那么所有 $u(d_k)$ $(1\leqslant k\leqslant N)$ 将构成一个序列 C_1，通过信度检验可知其是否有变化趋势。

若设 $\overline{m_i}$ 表示反序列中第 i 个样本 x_j 大于 x_i $(i\leqslant j\leqslant N)$ 的累计数，当 $i'=N+1-i$ 时，如果

$\overline{m}_i = m_{i'}$，则反序列的$\overline{u}(d_k)$有下式给出：

$$\begin{cases}\overline{u}(d_i) = -u(d_i) \\ i' = N+1-i \qquad (i,i' = 1,2,\cdots,N)\end{cases}$$

式中，所有$\overline{u}(d_i)(1 \le i \le N)$将构成另一个序列$C_2$。当序列$C_1$和$C_2$存在明显变化趋势时，即超过信度线。如果$C_1$和$C_2$曲线相交于信度线之间，则交点便是突变点的开始。

荒漠化地区降水年际变化的归一化反常指数

李宝林，周成虎：东北平原西部沙地的气候变异与土地荒漠化。自然资源学报，2001，16(3)

(1) 归一化反常指数：

$$I_{\text{nda}i,t} = (P_{i,t}) / \sigma_i$$

式中，$P_{i,t}$是i测站t年的降水量，P多年降水量的均值，σ_i是i测站的降水量标准偏差。

(2) 时间序列的变量一般可以表示为：

$$X(t) = D(t) + P(t) + e(t)$$

式中，$D(t)$为趋势成分，$P(t)$为周期性成分，$e(t)$为随机性成分。

陆地碳循环平衡模型

王绍强等：东北地区陆地碳循环平衡模拟分析。地理学报，2001，56(4)

(1) 植被生物量方程：

在自然状态下，不考虑人类活动的影响，以及忽视食草动物的影响，生物量的控制方程可以表示为：

$$\frac{dV}{dt} = NPP - f_{VL} \tag{1}$$

式中，$\frac{dV}{dt}$为单位时间、单位面积变化的生物量($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)；$NPP$为净光合作用速率($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)，即净第一性生产力；$f_{VL}$为植被凋落速率($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)，它同生物量$V$的线性关系表达式为$f_{VL} = k_{VL}V$，$k_{VL}$为植被凋落速率系数。

(2) NPP模型：

$$NPP = I_{rd}\frac{rR_n(r^2 + R_n^2 + rR_n)}{(r + R_n)(R_n^2 + r^2)}\exp(-\sqrt{9.87 + 6.25R_{DI}}) \tag{2}$$

式中，r为年降水量(mm)；R_n为年净辐射($kcal \cdot hm^{-2}$)，它代表热量或温度因子，是生态系统生物物理过程强度的度量；NPP为自然植被的净第一性生产力($t \cdot D \cdot W \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)；$I_{rd}$为辐射干燥度，$I_{rd} = R_n/(Lr)$，$L$为蒸发潜热，$I_{rd}$是辐射能量的年净收入与蒸发掉年降水所需能量的比值，是表示气候干燥程度的一种指数。

(3) 采用Kwon建立的植被凋落速率方程：

$$k_{VL} = k_e\frac{C_1}{K_M + C_1} \tag{3}$$

式中，k_e为凋落物速率常数；C_1为大气中的CO_2浓度；$K_M = 400ppm$为大气CO_2自饱和速率；根据植被生物量、NPP模型和以上方程，可以计算出k_e和k_{VL}参数值，并可估算陆地生态系统自然植被的碳通量。

1) 凋落物方程：

$$\frac{dL}{dt} = f_{VL} - f_{LH} - f_{LC} \tag{4}$$

式中，$\frac{dL}{dt}$为单位时间、单位面积变化的凋落物量($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)；$f_{LH}$为凋落物转变为土壤腐殖质的腐殖化速率($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)；$f_{LC}$为凋落物分解成$CO_2$的速率($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)。

凋落物分解包括有机成分分解和腐殖质形成两个过程，并都是在微生物的作用下进行的；凋落物分解过程中，微生物一方面促使有机成分分解矿化(释放出CO_2)，另一方面又利用分解有机物放出的能量，把一些简单的有机产物转变为复杂的有机化合物。凋落物矿质化速率f_{LC}和腐殖化速率f_{LH}与植被类型和凋落物组成、微生物的活性、温度、土壤水、土壤通气性和土壤结构有关。

在平衡状态下，陆地生态系统中凋落物量没有发生变化，因为输入量等于输出量：

$$f_{VL} = f_{LH} + f_{LC} = K \cdot L_t \tag{5}$$

$$L_t = \frac{f_{VL}}{K} = \frac{V \cdot k_{VL}}{\sum K_j} \tag{6}$$

式中，K_j ($j = 1,2,3$)分别为凋落物分解速率f_{LC}和f_{LH}的系数，采用Foley的凋落物分解速率系数公式，K_j值计算式为$K_j = \varepsilon_j \times 10^{(-1.4553 - 0.001\,417\,5A_{ET})}$，$j$=1,2,3分别代表植物的叶、茎、根组成部分，表示叶、枝、根等不同凋落物类型分解的难易程度，分别等于1.0，0.5，2.0，A_{ET}为每年实际蒸发量($mm \cdot a^{-1}$，平衡态下等于水面蒸发量)。

2) 土壤腐殖质方程：

腐殖质的变化率主要取决于凋落物腐殖化速率 f_{LH} $(t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1})$ 和腐殖质矿质化速率 $f_{HC}(t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1})$ 之差，它的表达式为：

$$\frac{dH}{dt} = f_{LH} - f_{HC} \tag{7}$$

式中，$\frac{dH}{dt}$ 为单位时间、单位面积腐殖质的变化速率 $(t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1})$。

3) 估算土壤腐殖质分解速率 f_{HC} 的半机理半经验的统计模型：

$$f_{HC} = K_{HC}\left\{\exp\left[F + \left(Q \cdot T \cdot \frac{P}{K+P}\right)\right] - 1.0\right\} \tag{8}$$

式中，f_{HC} 为土壤呼吸速率 $(gm^{-2} \cdot d^{-1})$；$F(gm^{-2} \cdot d^{-1})$ 是温度为零、水汽不受限制时的碳通量；Q(℃$^{-1}$)代表温度常数；T(℃)为月平均温度；P(cm)为月平均降水量，K $(cm \cdot mon^{-1})$ 为降水函数的自饱和系数；在自然状态下，F、Q 和 K 分别为 0.579、0.0396、2.19；K_{HC} 为土壤腐殖质分解常数；联立方程(6)、(7)、(8)，可以估算出土壤腐殖质碳量分布和土壤与大气之间的碳通量，当月均温<−13.3或者>33.5℃，则土壤呼吸速率为零。

污染物的环境容量模型

王祥荣：上海外高桥保税区可持续发展的生态环境规划研究. 生态学报，2001，21(5)

$$Q = C_0 \times \mu \times H \times B$$

式中，C_0 为污染物的环境质量目标；μ 为风速；H 为逆温层高度；B 为垂直于风向的区域尺度。

第八章 地　貌

地球形状数学表达公式

方俊：地球的形状．地理学报 1935，2(1)

(1) 应用测量方法以定地球之形状及大小：自秘鲁测量完毕地偏之说为人公认后，量地学又入一新时期，计算经线之长度所根据之标准不复为正球体而为一椭圆之旋转体，其离心率为 $e=\sqrt{\dfrac{a^2-b^2}{a^2}}$，椭率为 $f=\dfrac{a-b}{a}=1-\sqrt{1-e^2}$，任何两纬度 φ_1 及 φ_2 间之经长为：

$$s=\int_{\varphi_1}^{\varphi_2}\frac{a(1-e^2)\mathrm{d}\varphi}{\sqrt{(1-e\sin^2\varphi)^3}}=a\left[\left(1-\frac{1}{4}e^2-\frac{3}{64}e^4\right)m+\left(\frac{3}{4}e^2+\frac{3}{16}e^4\right)\sin m\cos 2l+\frac{15}{128}e^4\sin 2m\cos 4l+\cdots\right]$$

式中，a 及 b 为长径及短径；$m=\varphi_2-\varphi_1$；$l=\varphi_2-\varphi_1$。

(2) 应用加速率测量以求地球之形状：

$$N=\frac{a}{2\pi G}\int\Delta g f(\theta)\mathrm{d}s$$

式中，

$$f(\theta)=\frac{1}{2}\left\{\operatorname{cosec}\frac{1}{2}\theta+1-6\sin\frac{1}{2}\theta-5\cos\theta-3\cos\theta\left[\sin\frac{1}{2}\theta(1+\sin\frac{1}{2}\theta)\right]\right\};$$

N 为地型高出(或低于)自转球之距离；G 为平均加速率；Δg 为某定点之加速率差数(实测者与由自转球面所计算者之差)；θ 为定点至任何一点之角距。

(3) 应用加速率及月角差观测以计算地球之长径：

$$a=\frac{g\cdot e\left(1+\dfrac{m}{M}\right)T^2\sin^3P}{4\pi^2\left(1+\dfrac{W^2a}{g\cdot e}-\dfrac{g\cdot p-g\cdot e}{g\cdot e}\right)}$$

式中，a 为地球长径；W 为地球自转之角速率；$P=\sin^{-1}\dfrac{a}{R}$；R 为地球至月球之距离；T 为月球绕地球一周所需之平时；M 及 m 为地球与月球之总重量；$f=\dfrac{g\cdot ea^2}{M\left(1+\dfrac{W^2a}{g\cdot e}-\dfrac{g\cdot p-g\cdot e}{g\cdot e}\right)}$ 为万有引力常数；$g\cdot e=9.780\,52m$；$\dfrac{g\cdot p-g\cdot e}{g\cdot e}=0.003\,467\,8$。

(4) 应用月球之不规则运动以定椭率：

$$f(f+1)=\frac{5}{2}\frac{W^2a}{g\cdot e}-f\frac{W^2a}{g\cdot e}-\frac{g\cdot p-g\cdot e}{g\cdot e}$$

式中，变量及参数含义同上。

自由河曲形成与演变公式

林承坤，陈钦銮：下荆江自由河曲形成与演变的探讨．地理学报，1959，(25)2

(1) 河曲长度变化公式为：

$$l=\frac{2bu}{\sqrt{gh}}\left[l-\frac{l}{100}f\left(\frac{\mu b}{h^{5/2}}\right)\right]$$

式中，μ 为黏滞系数；b 为河床宽度；u 为流速；g 为重力加速度；h 为深度；f 为以括弧表示的函数。

(2) 荆江多年流量 Q 与平均河弯长度 L 的经验公式：

$$L=0.343Q^{2.29}$$

(3) 凹岸附近与凸岸附近水面高度的对比符合于如下方程式：

$$h_{凸}+\frac{V_{凸}^2}{2g}=h_{凹}+\frac{V_{凹}^2}{2g},$$

式中，$h_{凸}$ 为凸岸横比降落差值；$V_{凸}$ 为凸岸流速；g 为重力加速度；$h_{凹}$ 为凹岸横比降落差值；$V_{凹}$ 为凹岸流速。

产生横比降第二个原因，是由于水流弯道的离心力，它的数值决定于如下方程式：

$$\mathrm{d}F=\Delta m\frac{V^2}{r_1}$$

式中，F 为离心力；Δm 为所取液体的质量；V 为流速的速度；r_1 为流速轨迹的半径。

Л. A. 瓦尔达尼扬茨公式

夏天儒：祁连山北段古冰川作用与冰缘地貌特征的初步观察 地理学报，1960，26(3)

$$\Delta H = \frac{P}{P_1}\left(H + \frac{K}{2}\right)$$

式中，ΔH 为雪线的降低；P 为古代冰川较现代冰川增长的面积；P_1 为古代冰川总面积；H 为现代冰川末端和现代冰川雪线的高度差；$\frac{K}{2}$ 为冰川末端降低的半数。

有关沙丘移动的线性回归方程式

朱震达、郭恒文、吴功成：塔克拉玛干沙漠西南地区绿洲附近沙丘移动的研究 地理学报，1964，30(1)

(1) 风速和通过丘顶气流中的输沙量关系：

$$Q = 0.418\,9V^{1.36} \quad (r = 0.81)$$

式中，Q 为输沙量；V 为风速。

(2) 风速和沙丘背风坡坡麓前移值的关系：

$$D = 0.055\,47V^{2.47} \quad (r = 0.98)$$

式中，Q 为输沙量；V 为风速。

(3) 在同一风速、同一性质地面的条件(指沙子机械组成、湿润情况及植物被覆程度等)下，沙丘的前移速度仍有差异，这种差异乃是受沙丘本身形态发育规模大小的影响，而形态发育规模的大小可以用沙丘长度(L)、宽度(W)与高度(H)三个形态示量指标来加以表示，根据若干典型地区实测的结果，它们相互之间成直线相关，其回归方程如下：

在皮山西南裸露平坦少砾地面上的新月形沙丘为：

$$L = 15.8H + 3.8 \qquad (r = 0.99)$$

$$W = 18.82H - 1.38 \qquad (r = 0.96)$$

在莎车布古里沙漠东南具有亚黏土的沙土平原上的新月形沙丘为：

$$L = 6.5 + 10.4H \qquad (r = 0.97)$$

$$W = 4.6 + 11.2H \qquad (r = 0.97)$$

河口沙坎形成条件分析公式

钱宁，谢汉祥，周志德等：钱塘江河口沙坎的近代过程 地理学报，1964，30(2)

(1) 山水造床流量公式：

$$Q = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N} Q_i^m}{N}\right]^{-1/m}$$

式中，Q 为山水造床流量；N 为统计次数；m 为流量-输沙率关系。

(2) 平面外形的定量指标：

$$S = \frac{B_2 - B_1}{L}\cdot\frac{B_2}{B_1}$$

式中，B_1 为潮区界断面宽度；B_2 为河口断面宽度；L 为这两个断面的距离。

黄河下游的冲淤规律分析公式

钱宁，张仁，赵业安等：从黄河下游的河床演变规律来看河道治理中的调水调沙问题 地理学报，1978，33(1)

(1) 在洪水没有普遍漫滩的情况下，洪峰时期的来沙量和水流挟沙能力之间的对比关系：

$$A = Q^2\left[\frac{S}{Q} - 0.33\left(\frac{S}{Q}\right)^{0.75}\right]$$

式中，A 为河道冲淤强度的参数；Q 为洪峰平均流量($m^3\cdot s^{-1}$)；S 为洪峰平均含沙量($kg\cdot m^{-3}$)。

(2) 孙口站流量和床沙质输沙率的关系式：

$$Q_s = 7.4\times10^{-4}Q^{1.07}S_{上}^{0.87}$$

式中，Q_s 为孙口站床沙质输沙率($t\cdot s^{-1}$)；Q 为流量($m^3\cdot s^{-1}$)；$S_{上}$ 为上站高村站床沙质含沙量($kg\cdot m^{-3}$)。

(3) 高村站汛期全沙(包括床沙质与冲泻质在内的全部悬移质泥沙)挟沙能力关系式：

$$Q_s = KQ^{1.15}S_{上}^{0.81}$$

式中，Q_s 为高村站全沙输沙率($t\cdot s^{-1}$)；$S_{上}$ 为上游花园口站全沙含沙量($kg\cdot m^{-3}$)；K 为挟沙系数。

作用于单颗沙粒的几个主要力的估算公式

凌裕泉，吴正：风沙运动的动态摄影实验 地理学报，1980，35(2)

(1) 气流作用于单颗沙粒迎面阻力：

$$P = \frac{\pi}{8}\rho_a U_r^2 d^2 C_D$$

式中，ρ_a 为空气密度($g \cdot cm^{-3}$)；U_r 为气流与沙粒的相对速度（等于气流速度与沙粒速度之差，即 $U_r = V - V_s$ ($cm \cdot s^{-1}$)；d 为沙粒粒径(cm)；C_D 为阻力系数。

(2) 沙粒的旋转所产生的升力：

$$F_{L,1} = \frac{\pi U_r \Omega d^2 \rho_a}{8}$$

式中，Ω 为沙粒旋转速度($r \cdot s^{-1}$)。

(3) 气流速度的切变所产生的升力：

$$F_{L,2} = \frac{K\mu U_r d(dV/dz)^{\frac{1}{2}}}{4(u/\rho_u)^{\frac{1}{2}}}$$

式中，dV/dz 为气流速度梯度($cm \cdot s^{-1}$)；μ 为空气黏滞性系数（μ=0.18× 10^{-6} $g \cdot s \cdot cm^{-2}$=1.8×10^4 $g \cdot cm \cdot s^{-1}$)。

(4) 沙粒碰撞时所产生的冲击力 F_1：

$$F_1 = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{MV_2 - MV_1}{\Delta t}$$

式中，S 为在某时间间隔内作用力的冲量。

泥石流基本特征值的计算模型

唐邦兴，杜榕桓，康志成等：我国泥石流研究。地理学报，1980, 35(3)

(1) 稀性泥石流流速公式：

$$V_c = \frac{1}{\alpha} V_b$$

式中，V_c 为泥石流流速；V_b 为相同条件下的清水流速；$\alpha = (1 + \phi \gamma_H)^{\frac{1}{2}}$、$\phi = \frac{r_c - 1}{r_H - r_c}$，$r_H$ 和 r_c 分别为泥石流及泥石质的容重。

(2) 黏性泥石流流速公式：

$$V_c = 25.38\left(\frac{d_{cp}}{H}\right)^{0.127}\left(\frac{\eta}{r_c\sqrt{gH^3}}\right)^{0.0576}\sqrt{gH}$$

式中，d_{cp} 为泥石流浆体样品固体颗粒平均粒径；η 为浆体刚性系数；H 为水深；g 为重力加速率。

(3) 泥石流的冲击力公式：

$$P = K_0 W$$

式中，K_0 为冲击时的动荷系数；W 为个别石块的重量；$K_0 = \left(\frac{V^2}{g\delta_c}\right)^{1/2}$，$\delta_c$ 为被撞击建筑物在静荷载下的变形。

根据蒋家沟测试初步分析，泥石流流体的整体压力计算公式为(另一类泥石流冲击力计算公式)：

$$\sigma = K\rho V^2 \sin\alpha$$

式中，K 为表征泥石流不均质性的系数；ρ 为泥石流流体密度。

地貌相关分析公式

蒋忠信：秦皇岛滨海区地貌的相关分析．地理学报，1981, 36(1)

(1) 秦皇岛滨海区相邻两级阶地之高差的沿程变化：

$$H_i = aS^2 + bS + c$$

式中，H_i 为相邻两级阶地之高差（i =1,2,3），且 $H_3 = T_3 - T_2 = 6.2 + 4.29S - 0.594S^2$，$H_2 = T_2 - T_1 = 3.2 + 3.02S - 0.424S^2$，$H_1 = T_1 = 3.3 - 0.911S + 0.290S^2$；$S$ 为距出山口的距离；a，b，c 为常数。

(2) 各期累计抬升高度间的内在联系：

$$0.736T_3 - 1.736T_2 + T_1 - 1.49 = 0$$

(3) 抬升梯度(抬升幅度随距离的变化率)：

$$\varDelta_3 = 4.29 - 1.19S$$

$$\varDelta_2 = 3.02 - 0.85S$$

$$\varDelta_1 = 0.58S - 0.91$$

式中，$\varDelta$ 为抬升梯度。

(4) 海滩视宽度 B (m)与海滩坡度 α (°)的关系：

$$B = 159\alpha^{-1.092}$$

(5) 海滩视宽度 B(m)与海滩中潮位砂的中值粒径 M_d (mm)之关系：

$$B = 11.7M_d^{-0.982}$$

(6) 流域面积 B (km^2)与河长 L (km)间有良好正比直线关系：

$$F = 11.23L - 125$$

地貌形态基本类型数量指标

李钜章：中国地貌形态基本类型数量指标初探．地理学报，1982，37(1)

(1) 台地隶属函数：

$$f_{台}(综)=\left\{f_{台}\left(\frac{S_1}{S_2}\right)\left[f_{台}(J_1)\right]^2 f_{台}(J_2)f_{台}\left(\frac{J_1}{J_2}\right)\right\}^{\frac{1}{5}}$$

式中，

$f_{台}\left(\frac{S_1}{S_2}\right)=\left[1-\left(\frac{S_1}{S_2}\right)^3\right]^{-1}$ 为台面和台坡平面投影面积比的分隶属函数；

$f_{台}(J_1)=\left[1+0.004\sin h(10J_1)^4\right]^{-1}$ 为台面平均坡度的分隶属函数；

$f_{台}(J_2)=\left[1+\left(\frac{0.40}{J_2}\right)^6\right]^{-1}$ 为台坡平均坡度的分隶属函数；

$f_{台}\left(\frac{J_1}{J_2}\right)=\left[1+\left(3\frac{J_1}{J_2}\right)^{10}\right]^{-1}$ 为台面、台坡平均坡度比的分隶属函数；

S_1 和 J_1 分别为台面的平面投影面积和平均坡度；S_2 和 J_2 分别为台坡的平面投影面积和平均坡度。

当 $f_{台}(综)>0.7$ 时可以认为是台地，而 $f_{台}(综)\leqslant 0.7$ 时可以认为是非台地。

(2) 平原隶属函数：

$$F_{平}=F_{台}^{C}\wedge(f_{平}(J)\vee\frac{1}{3}[2f_{平}(\Delta H-\Delta h)+f_{平}(\Delta H)])$$

式中，

$F_{台}^{G}=1-F_{台}$；

$f_{平}(J)=\begin{cases}1 & (J\leqslant 0.10)\\ 0 & (J>0.10)\end{cases}$ 为图斑平均坡度的分隶属函数；

$f_{平}(\Delta H-\Delta h)=\left[1+\left(0.3\sin h\frac{\Delta H-\Delta h}{10}\right)^3\right]^{-1}$ 为图斑高差与图斑边缘高差之差的分隶属函数；

$f_{平}(\Delta H)=\left[1-\left(1.3\tan h\frac{\Delta H}{140}\right)^{10}\right]^{-1}$ 为图斑高差的分隶属函数；

H 为图斑海拔高度；h 为图斑相对高度；ΔH 为图斑高差；Δh 为图斑边缘高差；J 为图斑平均坡度；符号"∧"代表取最小值；"∨"代表取最大值。

(3) 丘陵隶属函数：

$$F_{丘}=F_{台}^{C}\wedge\left\{f_{平}^{c}(J)\wedge\frac{1}{3}\left[2f_{丘}(\Delta H)+f_{丘}(\Delta h)\cdot f_{丘}(\frac{\Delta h}{\Delta H})\right]\right\}$$

式中，

$f_{丘}(\Delta H)=\left[1+0.39\left(\lg\sin h\frac{\Delta H}{25}-1.55\right)^2\right]^{-1}$ 为图斑高差的分隶属函数；

$f_{丘}(\Delta h)=\{1-[0.2\ln(\Delta H+1)]^{10}\}^{-1}$ 为图斑边缘高差的分隶属函数；

$f_{丘}\left(\frac{\Delta h}{\Delta H}\right)=\left[1+0.003\sin h\left(10\frac{\Delta h}{\Delta H}\right)\right]^{-1}$ 为图斑高差和图斑边缘高差之比的分隶属函数。

(4) 山地隶属函数：

$$F_{山}=F_{台}^{C}\wedge\left\{f_{平}^{C}(J)\wedge\frac{1}{3}\left[2f_{山}(\Delta H)+f_{山}\left(\frac{\Delta h}{\Delta H}\right)\cdot f_{山}(\Delta H-\Delta h)\right]\right\}$$

式中，$f_{山}(\Delta H)=\left[1+\left(\frac{200}{\Delta H}\right)^4\right]^{-1}$ 为图斑高差的分隶属函数；$f_{山}\left(\frac{\Delta h}{\Delta H}\right)=\left[1+\left(\lg\frac{\Delta h}{\Delta H}+0.1\right)^2\right]^{-1}$ 为图斑高差和图斑边缘高差比的分隶属函数；$f_{山}(\Delta H-\Delta h)=\frac{(\Delta H-\Delta h)^2}{9+(\Delta H-\Delta h)^2}$ 为图斑高差和图斑边缘高差之差的分隶属函数。

(5) 中国山地划分的综合评价指标：

$$\phi=0.45\left[1+(3.95-\lg H)^2\right]^{-1}+0.55[1+(3.8-\lg h)^8]^{-1}$$

式中，H 为海拔高度；h 为相对高度；ϕ 为山地划分的综合指标，其相应的阈值为：

$\phi\geqslant 0.985$　　极高山

$0.985>\phi\geqslant 0.9154$	高山
$0.9154>\phi>0.662$	中山
$\phi\leqslant 0.662$	低山

卵石推移质汇入百分数计算的模式

林承坤：长江三峡卵石推移质来源的研究．地理学报，1982，37(2)

(1) 基本假定：

(a) 从上述资料表明，卵石岩类组成，决定于补给区地质地貌条件，因此可用各补给区及汇入三峡的卵石岩类百分数，建立计算卵石推移质来源的模式；(b) 不同岩类卵石的比重差别不大(约在 2.7~ 3.2)，因而不考虑卵石比重不同的运动过程的分选作用；(c) 河床上沉积的卵石与运动的卵石两者岩类百分数基本一致；(d) 卵石推移质运动过程中的磨损遵循史当贝(H.U.Sternber)公式 $W=W_0e^{-aL}$，其中 W 为卵石颗粒经过距离 L 以后的重量，L 为磨损距离，W_0 为卵石颗粒起始点的重量，α 为磨损系数(因岩性不同而异)。

(2) 计算方法：

$$\left.\begin{array}{l}[aa]x_1+[ab]x_2+\cdots+[ay]x_m=[aT]\\ [ba]x_1+[bb]x_2+\cdots+[by]x_m=[bT]\\ \vdots\qquad\quad\vdots\qquad\qquad\quad\vdots\qquad\quad\vdots\\ [ya]x_1+[yb]x_2+\cdots+[yy]x_m=[yT]\end{array}\right\}$$

式中，设某流域由 m 个补给区构成，A 补给区卵石岩类百分数为 $a_1,a_2,\cdots,a_n$，B 补给区卵石岩类百分数为 b_1，b_2，⋯，b_n，s 补给区卵石岩性百分数 s_1，s_2，⋯，s_n，y 补给区卵石岩类百分数为 $y_1,y_2,\cdots,y_n$，它们汇入到三峡 T 点，岩类百分数为 $T_1,T_2,\cdots,T_n$；又设 A 补给区卵石汇入 T 处的百分数为 x_1、B 补给区为 x_2，y 补给区为 x_m。$x_1,x_2,\cdots,x_m$ 值求出后，即可知道各补给区卵石推移质汇入三峡的百分数。

突变模型的数学表达

郭绍礼、乔文虎、李立贤：应用突变模型研究沙漠化过程的演变——以东北地区为例．地理学报，1982，37(2)

$$X^3+QX+P=0$$

式中，主分量 $P=0.002\,24\,X_1-0.009\,196\,X_2-0.927\,33\,X_3-0.015\,319X_4+0.297\,102$ 表示土地表面的复合状况，X_1 为植被覆盖状况，X_2 为开垦面积，X_3 为土层的机械组成，X_4 为沙丘的一般高度；控制变量 $Q=0.000\,155Y_1-0.000\,359Y_2+0.020\,86Y_3-0.031\,714\,Y_4-0.008\,455\,Y_5+0.315\,266$ 表示复合湿润状况，Y_1 为海拔高度，Y_2 为年平均降水量，Y_3 为年平均温度，Y_4 为年平均风速，Y_5 为地表湿度；X 为状态变量。

河床地貌演变研究的计算方法

刘书楼，洪笑天，马绍嘉等：河床地貌演变研究的计算方法——河床冲淤计算和地形图绘制．地理研究，1982，1(4)

1. 冲淤量 $\sum Q_2$ 的间接计算方法

(1) 泥沙浓度的垂直分布：

$$C_y=C_a\left(\frac{d-y}{y}\cdot\frac{a}{d-a}\right)^z$$

式中，C_y 为距床面 y 处的浓度；C_a 为距床面 a 处的浓度；d 为平均水深；$z=V_s/KU^*$，$V_s^2=\frac{F}{C_0}\cdot\frac{1-\rho_f}{\rho_f}\cdot qD$，$V_s$ 为沉速；U^* 为泥沙阻力摩擦流速；K 为卡门常数；F 为与泥沙形状有关的常数；ρ_f 为水的密度，g 为重力加速度，D 为粒径。

(2) 断面输沙量：

$$Q=\int\left(\int\overline{C}_y\overline{V}\mathrm{d}s\right)\mathrm{d}t$$

式中，$\overline{C}_y$ 为断面平均浓度；$\overline{V}$ 为水流断面平均流速；S 为断面面积

2. 冲淤量 $\sum Q_2$ 的直接计算方法

(1) 长方体分割法：

设某一网格点位于 I, j 网格坐标的交点上，通过 $x=I$, $y=j$ 按一定逻辑条件选择参考点 T_1~ T_4，假设结点被所选参考点屏蔽，以 $T_{i,j}$ 为相对新原点，T_1~ T_4 用新坐标表示，求出结点的高程 $Z_{i,j}$。则：

$$Z_{i,j}=(\overline{Z}_{TX}+\overline{Z}_{TY})/2$$

式中：

$$\overline{Z}_{TX}=Z_{2\text{-}3}+(Z_{1\text{-}4}-Z_{2\text{-}3})\cdot|X_{2\text{-}3}|/(|X_{1\text{-}4}|+|X_{2\text{-}3}|);$$

$$\overline{Z}_{TY}=Z_{3\text{-}4}+(Z_{1\text{-}2}-Z_{3\text{-}4})\cdot|Y_{3\text{-}4}|/(|Y_{1\text{-}2}|+|Y_{3\text{-}4}|);$$

$$Z_{1\text{-}2}=Z_2+(Z_1-Z_2)\cdot|X_2|/(|X_1|+|X_2|);$$

$$Z_{2\text{-}3}=Z_3+(Z_2-Z_3)\cdot|Y_3|/(|Y_2|+|Y_3|);$$

$$Z_{3\text{-}4}=Z_4+(Z_3-Z_4)\cdot|X_4|/(|X_3|+|X_4|);$$

$$Z_{1\text{-}4}=Z_4+(Z_1-Z_4)\cdot|Y_4|/(|Y_1|+|Y_4|).$$

建立以$Z_{i,j}$为元面的网格结点矩阵$\{Z_{i,j}\}$：

$$\{Z_{i,j}\}=\begin{Bmatrix} Z_{1,1} & Z_{1,2} & \cdots & Z_{1,i} \\ Z_{2,1} & Z_{2,2} & \cdots & Z_{2,i} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Z_{j,1} & Z_{j,2} & \cdots & Z_{j,i} \end{Bmatrix}$$

则：

$$V_t=\sum_{j=1}^{j}\sum_{i=1}^{i}\{Z_{i,j}\}\cdot K$$

式中，K为与网格分隔间隔相关的常数。

(2) 横断面分割法：
设横截面垂直于X轴，截面面积为$S(x)$。
设截面总面积为：

$$S(x_i)=\sum_{1}^{j}\frac{Z_{j-1}+Z_j}{2}\Delta y$$

则体积为：$V_t=\sum_{1}^{i}\sum_{2}^{j}\frac{Z_{j-1}+Z_j}{2}\Delta y\Delta x$

设横截面垂直于Y轴，则体积为：

$$V_t=\sum_{1}^{j}\sum_{2}^{i}\frac{Z_{i-1}+Z_i}{2}\Delta y\Delta x$$

(3) 柱体分割法：
设S_i为第i个等高面积，对每个x值成对的y坐标用(1，2)，(3，4)，…,($2n-1$，$2n$)表示，n=1，2，3…x被分割数为K，按序号1，2，3,…,K排列，则：

$$S_i=\frac{\Delta x}{2}\left[\sum y_{1,(2n-1)}+\sum y_{K,(2n-1)}-\sum y_{1,2n}-\sum y_{K,2n}\right]+\Delta x\left[\sum_{i=2}^{k-1}y_{i,(2n-1)}-\sum_{i=2}^{k-1}y_{i,2n}\right]$$

式中，$y_{K,2n}$的下标K为分割序号，n为成对的y坐标序号。

设等高距为ΔZ，则：

$$V_t=\sum_{1}^{m}S_i\cdot\Delta Z$$

式中，m为切割数。

3. 河床等高线的面拟合光滑方法

$$\begin{cases} x=p_0+p_1Z+p_2Z^2+p_3Z^3 \\ y=q_0+q_1Z+q_2Z^2+q_3Z^3 \end{cases}$$

式中，p，q为常数；Z为参数(曲线从(x_1，y_1)变到(x_2，y_2)时，Z从0变到1)。

x，y满足条件：

$Z=0$时：

$$x=x_1,\ y=y_1,\ \mathrm{d}x/\mathrm{d}y=\gamma\cos\theta_1,\mathrm{d}y/\mathrm{d}z=\gamma\sin\theta_1$$

$Z=1$时：

$$x=x_2,y=y_2,\mathrm{d}x/\mathrm{d}y=\gamma\cos\theta_2,\mathrm{d}y/\mathrm{d}z=\gamma\sin\theta_2$$

式中：$\gamma^2=(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2$; $p_0=x_1$; $p_1=\gamma\cos\theta_1$；$p_2=3(x_2-x_1)-\gamma(\cos\theta_2+2\cos\theta_1)$；$p_3=-2(x_2-x_1)+\gamma(\cos\theta_2+\cos\theta_1)$；$q_0=y_1$；$q_1=\gamma\sin\theta_1$；$q_2=3(y_2-y_1)-\gamma(\sin\theta_2+2\sin\theta_1)$；$q_3=-2(y_2-y_1)+\gamma(\sin\theta_2+\sin\theta_1)$。

长江三峡黄陵背斜区产沙模数

林承坤：长江三峡黄陵背斜区产沙特性与数量计算。地理学报，1985, 40(4)

$$M=194.7\left(\frac{TDR}{P}\right)^{0.624}$$

式中，M为产沙模数($\mathrm{t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}}$)；$T$为风化壳厚度(m)；$D$为切割密度($\mathrm{km\cdot km^{-2}}$)；$R$为径流深度(m)；$P$为森林覆盖度(%)。

地形计算公式

卢耀如：中国喀斯特地貌的演化模式。地理研究,1986，5(3)

(1) 地形的海拔高年变化值计算公式：

$$\Delta H=H_s-(H+H_M)$$

式中，ΔH为地形的海拔高年变化值；H_s为年构造上升的实际高度值；H为年地表岩面平均溶蚀削低的高度；H_M为年机械侵蚀对地表岩面削低的高度。

(2) 年地表径流对岩石的溶蚀公式：

$$H_c=H_{c1}+H_{c2}$$

式中，H_{c1}为年地表径流对岩石溶蚀削低的高度；H_{c2}为年地下径流于消入地下前对岩面溶蚀削低的高度。

(3) 地形海拔高年变化：

$$\sum_{i=1}^{n}\Delta H_i=\sum_{i=1}^{n}(H_i-H_{i-1})=$$

$$\sum_{i=1}^{n}\left[L_{\mu i}-(D_{\mu i}+M_{\mu i})\right]\Delta t_i$$

式中，ΔH_i 为 i 间隔时间内，实际上升高度和沉降深度；$L_{\mu i}$ 为 i 间隔时间平均上升速率；$D_{\mu i}$ 为 i 间隔时间平均溶蚀速率；

(4) 年机械侵蚀率的计算公式：

$$M_\mu=\left(Q_s\cdot\rho_s\cdot\gamma_w/A\cdot\bar{\gamma}_R\right)\times 1000$$

式中，M_μ 为年机械侵蚀率；Q_s 为年地表径流量；ρ_s 为固体径流系数；γ_w 为水溶重；A 为计算点以上控制的面积；$\bar{\gamma}_R$ 为岩石平均溶重。

地貌气候单位线模型及流路概率计算公式

陈绳甲：地貌气候单位线的一个算例 地理研究 1986，5(3)

(1) 适合于地貌特性比较均一：

$$h(t)=\sum_{s\in S}\frac{e^{-1/\beta}}{\beta\cdot\Gamma(\gamma)}(t/\beta)^{\gamma-1}\ p(s)$$

式中，$\gamma=k(\alpha+1)$；α，β 为参数；$h(t)$ 为地貌气候单位线纵坐标；t 为时间；s 为某一具体流路；S 为流域流路集合；$p(s)$ 为概率。

(2) 适合于地貌不够均一：

$$\gamma=\sum_{i=1}^{k}\alpha_i+k$$

式中，参数同上。

(3) 适合于地貌很不均一：

$$h(t)=\sum_{s\in S}\left\{\left(\frac{\beta_2}{\beta_1}\right)^{c}\left(\frac{\beta_3}{\beta_2}\right)^{Q_1}\Gamma(R_1,\beta_3)\cdot\left[1+\frac{t}{\beta_1\cdot\beta_2\cdot\beta_3\cdot R_2}\times\left(\beta\cdot N\cdot Q+\beta\cdot M\cdot O+\frac{\beta_3\cdot N^2\cdot Q_2\cdot Q_3\cdot t}{2\cdot\beta_1\cdot\beta_2\cdot R_3}+\frac{\beta_3\cdot M\cdot O\cdot N\cdot Q_2\cdot t}{2\cdot\beta_1\cdot\beta_2\cdot R_3}+\frac{M\cdot O\cdot t}{2\cdot\beta_2^2\cdot\beta_3\cdot R_4\cdot R_3}+\frac{\beta_3\cdot M^2\cdot H\cdot O\cdot N\cdot Q_3\cdot t}{2\cdot\beta_1\cdot\beta_2^2\cdot R_4\cdot R_3}+\frac{M^2\cdot H\cdot O\cdot N^2\cdot T\cdot Q_3\cdot t}{2\cdot\beta_2^2\cdot R_5\cdot R_4\cdot R_3}\right)\right]\right\}\cdot P(s)$$

式中，$O=(\alpha+1_1)$；$Q_1=(\alpha_1+\alpha_2+2),\cdots$，$Q_4=(\alpha_1+\alpha_2+5)$；$R_1=(\alpha_1+\alpha_2+\alpha_3+2),\cdots$，$R_5=(\alpha_1+\alpha_2+\alpha_3+6)$；$M=(\beta_1-\beta_2)$；$N=(\beta_2-\beta_3)$；$H=(\alpha_1+2)$；$\alpha_i$、$\beta_i$ 为参数

(4) 流路概率的计算公式：

1) 初始概率 $\theta_{a0}(0)$ 的计算公式：

$$\begin{cases}\theta_1(0)=N_1 f_1\\ \theta_2(0)=N_2 f_2\\ \theta_3(0)=N_3 f_3\end{cases}$$

2) 转移概率 P 公式：

$$\begin{cases}P_{12}=N_{12}/N'_{1w}\\ P_{13}=N_{1,3}/N'_{1,w}\\ P_{23}=1\end{cases}$$

式中，f_1、f_2 和 f_3 分别为合计面积权；N 为河流数目；N' 为所有可发生路径的支流数目，注脚中无逗号为连续，有逗号为间断。

小流域侵蚀地貌形态模型

钱小苏，陈山林，艾南山等：小流域侵蚀地貌过程与耗散结构 水土保持通报，1986，6(6)

$$G_m(t)=\frac{C(t)\cap P(t)\cap S(t)\cap G(t)\cap M(t)}{t}$$

式中，$C(t)$, $P(t)$, $S(t)$, $G(t)$, $M(t)$ 分别为流域的气候、植被、土壤、地质构造及人类活动过程。

理想流域河谷纵剖面抛物线方程

蒋忠信：滇西北三江河谷纵剖面的发育图式与演化规律 地理学报，1987，42(1)

$$h=H\left(\frac{l}{L}\right)^N$$

式中，h 为纵剖面上某点与河口的高差；H 为河源与河口间的高差；l 为纵剖面上某点距河口的距离；L 为纵剖面线水平距离；N (> 0)为形态指标，当 0< N< 1 时为上凸抛物线，N =1 时为直线；N > 1 时为下凹抛物线。

中国地貌基本类型分类指标系统

李钜章：中国地貌基本形态划分的探讨 地理研究，1987，6(2)(注：此模型中的 th、sh 为函数名，不能改，均为正体)

(1) 台地隶属函数：

$$F_t=\begin{cases}1 & (f_t>0.7)\\0 & (f_t\leqslant 0.7)\end{cases}$$

且：

$$f_t=\left\{\left[1+\left(\frac{s_1}{s_2}\right)^{-3}\right]^{-1}\cdot\left[1+0.004\left(\mathrm{sh}(10J_1)^4\right)\right]^{-2}\cdot\right.$$

$$\left.\left[1+\left(\frac{0.4}{J_2}\right)^6\right]^{-1}\cdot\left[1+\left(\frac{3J_1}{J_2}\right)^{10}\right]^{-1}\right\}^{\frac{1}{5}}\wedge$$

$$\left[\mathrm{th}\left(\frac{h_a}{30}\right)\cdot\mathrm{th}\left(\frac{h_b}{40}\right)\right]^{\frac{1}{2}}$$

式中，S_1、J_1 分别为台面平面投影面积和平均坡度；S_2、J_2 分别为台坡平面投影面积的平均坡度；h_a 为台坡高度；h_b 为台地比高。

(2) 平原隶属函数：

$$F_p=F_t^c\wedge\left\{f_p(J)\cdot\frac{1}{3}\times\left[2\cdot\left(1+\mathrm{sh}\frac{\Delta H-\Delta h}{10}\right)^{-1}+A\right]\right\}^{\frac{1}{2}}$$

式中，$A=\left[1+\left(1.3\mathrm{th}\dfrac{\Delta H}{140}\right)^{10}\right]^{-1}$ $f_p(J)=\mathrm{th}\left((8J)^{-2}\right)$；

$F_t^c=1-F_t$；J 为实体的平均坡度；ΔH 为实体高差；Δh 为实体边缘高差。

(3) 丘陵隶属函数：

$$F_q=F_t^c\wedge\left[f_p^c(J)\times\frac{1}{3}\times\left(2B^{-1}+C^{-1}\right)\right]^{\frac{1}{2}}$$

式中，$B=1+0.39\left\{\lg\left[\mathrm{sh}\left(\dfrac{\Delta H}{25}-1.55\right)^2\right]\right\}$；

$C=1+\left(0.2\ln(\Delta h+1)\right)^{10}$ $f_p(J)=1-f_q(J)$。

(4) 山地隶属函数：

$$F_s=F_t^c\wedge\left\{f_p^c(J)\cdot\frac{1}{3}\times\left[2\cdot\left[1+\left(\frac{200}{\Delta H}\right)^4\right]^{-1}+\right.\right.$$

$$\left.\left.\left[1+\left(\lg\left(\frac{\Delta h}{\Delta H}+0.1\right)\right)^2\right]^{-1}\right]\right\}^{\frac{1}{2}}$$

如最后按最大隶属度原则归类，则：

$F_s>\max\{F_t,F_q,F_p\}$，划归山地；

$F_q>\max\{F_t,F_s,F_p\}$，划归丘陵；

$F_p>\max\{F_t,F_s,F_q\}$，划归平原；

$F_t>\max\{F_p,F_s,F_q\}$，划归台地。

河型影响因素的判别模型

陆中臣，舒晓明：河型及其转化的判别 地理研究，1988，7(2)

$$\sqrt{B}/H=f(Q,Q_s,\alpha,T)$$

式中，Q、Q_s、α 分别为来自上游的流速、沙量及其过程，以及流域的形状因素；T 为新构造运动强度。

几何体侵蚀体(负值)与堆积体(正值)的泥沙重量计算公式

耿秀山,吴世迎：黄河海港动力地貌条件的初步探讨。地理学报，1988, 43(4)

$$G=\frac{S_1+S_2}{2}\times L\times D=v\times D$$

式中，S_1与S_2 为几何体两侧截面积(m^2)；L 为几何体宽度(m)；v 为几何体体积(m^3)；D 为泥沙的容重(近似取 $1.10\mathrm{t}\cdot\mathrm{m}^{-3}$)。

沙波推移率公式

黄进：沙波推移率公式的改进和验证及其应用。地理学报，1989, 44(2)

$$g_s=\alpha\gamma' h_sW_s$$

式中，g_s 为单宽推移率($\mathrm{t}\cdot\mathrm{m}^{-1}\cdot\mathrm{d}^{-1}$)；$\alpha$ 为沙波体积系数；γ' 为泥沙干容重 $\mathrm{t}\cdot\mathrm{m}^{-3}$；$h_s$ 为沙波高度(m)；W_s 为沙波速度($\mathrm{m}\cdot\mathrm{d}^{-1}$)。

侵蚀流域系统的信息熵模型

蒋忠信：矩形流域地貌信息熵的探讨，水土保持通报，1989, 9(6)

$$H=\int_{-\infty}^{\infty}g(x)\ln g(x)\mathrm{d}x$$

式中，$g(x)$ 为流域系统的信息熵的密度函数。

地貌发育阶段的定量分析公式

励强，陆中臣，袁宝印：地貌发育阶段的定量研究。地理学报，1990, 45(1)

(1) 侵蚀积分值：

$$E=1-\int_0^1X\mathrm{d}Y$$

式中，$X=\frac{a_i}{A}$，a_i为第i条等高线以上的面积，A为全流域面积；$Y=\frac{h_i}{H}$，h_i为i条等高线与流域最低点的高差，H为流域最高点与最低点的高差；E为相应的侵蚀积分值。

(2) 侵蚀分值过程线：

$$f(T)=1/(1+ae^{-bT})$$

式中，T为时期(10^4a)；a和b均为正常数。

(3) 流域自然侵蚀过程的侵蚀模数：

$$W_s=A\left\{\exp\frac{Bab\exp(-bT)}{1+a\exp(-bT)}-1\right\}$$

式中，W_s为侵蚀模数($t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$)；$A$和$B$为统计系数。

(4) 加速侵蚀量：

$$W_s''=W_s'-W_s$$

式中，W_s'总侵蚀量；W_s''为加速侵蚀量；W_s为自然侵蚀量。

(5) 划分流域发育阶段的定量指标：

$0\leqslant E<30\%$ 侵蚀早期

$30\%\leqslant E<70\%$ 侵蚀中期

$70\%\leqslant E<100\%$ 侵蚀晚期

河口分汊的定量表达

金元欢：河口分汊的定量表达及其基本模式，地理学报，1990，45(1)

(1) 河口汊道体系内点的数量：

$$N(v)=N(f)+N(j)+N(k)+N(o)$$

式中，$N(v)$为所有点的数量；$N(f)$为叉的数量；$N(j)$为合的数量；$N(k)$为结的数量；$N(o)$为口的数量。

(2) 再结合因子(recombination factor)：

$$\alpha'=\frac{N(j)+N(k)}{N(f)}$$

式中，α'为再结合因子。

黄淮海平原河流的纵剖面凹度特征分析公式

许炯心：黄淮海平原河流的纵剖面凹度特征，地理学报，1990，45(3)

(1) 纵剖面凹度的定量指标：

$$H=aL^b$$

式中，b为用来表示上凹程度的指数；H为落差；L为距河口的里程；a为待定常数。

(2) 能耗rQJ的沿程变化方程：

$$\frac{d(rQJ)}{dL}=rQ\frac{dJ}{dL}+rJ\frac{dQ}{dL}$$

式中，L为河长；Q为流量；r为水的比重；J为比降。

(3) 纵剖面凹度与含沙量的关系：

$$b=1.95\rho^{0.126}\qquad(r=-0.88)$$

式中，b为河流的凹度；ρ为出山口控制站的含沙量。

(4) 纵剖面凹度与流量沿程变化率的关系：

$$b=1.43+0.18\frac{Q_2-Q_1}{Q_1}\qquad(r=0.76)$$

式中，Q_1和Q_2分别表示河流出山口处控制站及河口控制站的流量。

(5) 多因素分析：

$$\ln b=0.566\ 7-0.104\ln\rho+0.051\ 03\frac{Q_2-Q_1}{Q_1}$$

式中，Q_1和Q_2分别表示河流出山口处控制站及河口控制站的流量；ρ为含沙量。

水库下游再造床过程的相关数学表达公式

尤联元、金德生：水库下游再造床过程的若干问题 地理研究，1990，9(4)

(1) 河水冲刷相关公式：

$$H=K_1Q^{\alpha_1}\rho^{\beta_1}$$

$$B=K_2Q^{\alpha_2}\rho^{\beta_2}$$

式中，H为水深；B为河宽；K_1，K_2为系数；α_1，α_2和β_1、β_2为指数，α为正值，β为负值。

(2) 影响河床形态变化公式：

$$Q^{\pm}Q_s^{-}\approx B^{\pm}H^{-}\lambda^{\pm}S^{-}P^{+}F^{-}$$

式中，Q为流量；Q_s为来沙量；B为河宽；H为水深；λ为曲流波长；S为坡降；P为曲折率；F为宽深比；+表示增大；-表示减小。

Γ型地貌瞬时单位线计算公式

靳长兴：Γ型地貌瞬时单位线探讨 地理研究，1990，9(4)

1. 形态定量律

(1) 河数律：

$$N_\omega = R_b^{\Omega-\omega} \qquad \omega = 1,2,\cdots,\Omega$$

(2) 河长率：

$$\overline{L}_\omega = \overline{L}_1 R_l^{\omega-1} \qquad \omega = 1,2,\cdots,\Omega$$

(3) 面积率：

$$\overline{A}_\omega = \overline{A}_1 R_a^{\omega-1} \qquad \omega = 1,2,\cdots,\Omega$$

(4) 比降率：

$$\overline{S}_\omega = \overline{S}_1 R_s^{1-\omega} \qquad \omega = 1,2,\cdots,\Omega$$

式中，N_ω、$\overline{L}_\omega$、$\overline{A}_\omega$、$\overline{S}_\omega$ 分别为级河流数、平均河长、平均面积及平均比降；R_b、R_l、R_a、R_s 为分叉比、河长比、面积比及比降比；Ω 为流域级别。

2. Γ型地貌瞬时单位线计算公式

$$U(0,t) = \sum_s P_s \cdot f(t)$$

$$f(t) = \frac{\beta_s^\alpha}{\Gamma(\alpha)}(t - t_{os})^{\alpha-1} e^{-\beta_s(t-t_{os})}$$

式中，$U(0,t)$ 为瞬时单位线；P_s 为雨滴经过该路径的概率；$f(t)$ 为在路径 S 上雨滴的等待时间密度函数；α、β_s 为参数，且 $\frac{\alpha}{\beta_s} = \left[\frac{1}{2}\sum_{X_i}\overline{L}X_i + \sum\overline{L}X_i/(P_{X_{K-1},X_i}\cdot R_B^{X_K-X_{K-1}})\right]/V$；$t_{os}$ 为雨滴在路径上的起涨时间，可以表示为 $t_{os} = L_{os}/V = \left[\sum_{X_i}\overline{L}X_i/(P_{X_{K-1},X_i}\cdot R_B^{X_K-X_{K-1}})\right]/V$，$L_{os}$ 为第 i 条路径坡面状态至流域出口的最近距离，P_{X_{K-1},X_K} 为状态转移概率，R_B 为分叉比，V 为汇流速度。

3. 路径概率

设路径 S 为：$S = \langle x_1, x_2, \cdots, x_k \rangle$

$$P_s = \theta_{x_1}\cdot P_{x_1,x_2}\cdot\cdots\cdot P_{x_{k-1},x_{k-2}}$$

式中，P_s 为路径概率；θ_{x_1} 为初始概率；P_{x_{k-1},x_k} 为状态转移概率

(1) 转移概率：

$$P_{x,y} = \begin{cases} \dfrac{2}{R_b} + \dfrac{R_b - 2}{2R_b - R_b^{(x-\Omega+2)}} \\ (x = 1,2,\cdots,\Omega-1 \quad y = x+1) \\ \dfrac{R_b - 2}{2R_b - R_b^{(x-\Omega+2)}} \displaystyle\bigcap_{i=x+1}^{y-1} \dfrac{1 - R_b^{k-\Omega}}{2 - R_b^{k-\Omega}} \\ (x = 1,2,\cdots,\Omega-2 \quad y \geqslant x+2) \end{cases}$$

式中，$P_{x,y}$ 为转移概率。

(2) 初始概率：

$$\theta_{x_1} = \left(\frac{R_b}{R_a}\right)^{\Omega-x_1} - \sum_{a=1}^{x_1}\left(\frac{R_b}{R_a}\right)^{\Omega-a}\cdot P_{a,x}$$

式中，θ_{x_1} 为初始概率；x_1 为状态

Leendertse 地转非线性二维流场数值模型

盛安定，汪思明，沈焕庭：湄洲湾中央深槽及两侧浅滩的成因探讨．地理学报，1994，49(1)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g\frac{\partial\zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho H}\left(\tau_x^s - \tau_x^b\right)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + fu = -g\frac{\partial\zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho H}\left(\tau_y^s - \tau_y^b\right)$$

$$\frac{\partial\zeta}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0$$

式中，u, v 为直角坐标中 x, y 方向的速度分量；f 为柯氏系数；ζ 为水面至平均水面的距离；g 为重力加速度；ρ 为海水宽度；H 为水面至床面的深度；τ_x^s、$\tau_x^b\left(\tau_y^s, \tau_y^b\right)$ 分别为自由水面和海底的 $x(y)$ 方向上的应力分量。

水流总能耗率(自河源至河口)

尹国康：系统论思想在地貌学中的应用．地理学报，1991，46(1)

$$W = \int_0^L \gamma QJ\mathrm{d}x$$

式中，W 为水流的能耗率；γ 为水的容重；Q 为平均流量；L 为河长；x 为沿河距离；J 为河流坡降。

对于具有不同 Q 和 J 沿程变化的河流来说，可以有不同的数值，但其中必有一种 $Q = f_1(x)$ 与 $J = f_2(x)$ 组合，使得 W 达到最小值。

曲流河型河床可动性表达式

金德生：实验流水地貌学研究的回顾与展望．地理学报，1991，46(1)

$$Z = \frac{r}{r_s - r} \cdot \frac{1}{d} (Q_t)^{1/3}$$

式中，r 和 r_s 分别为水、沙的比重；d 为泥沙粒径；Q_t 为流量及该级流量的历时。

划分分汊河道的结构类型的综合指标

黄锡荃，柳中坚：长江下游分汊河型内部结构和空间效应的研究。地理学报，1991，46(2)

$$K_n = \left(R_0 \cdot I_0 \cdot \beta \cdot \frac{\sqrt{B}}{H} \cdot \alpha \cdot N \right)^{\frac{1}{6}}$$

式中，N 为有效功率；R_0 为曲折率；I_0 为分汊系数；$\frac{\sqrt{B}}{H}$ 为宽深比；α 为分叉偏角；β 为宽长比。

河流处于相对稳定时的数学表示式

黄克中，钟恩清：最小水流能量损失率理论在河相关系中的应用．地理学报，1991，46(2)

$$VJ = 最小值$$

式中，$V = \frac{Q}{Bh}$ 为断面平均速度；Q 为总流量；B 为水面宽；h 为平均水深；$J = \frac{(nV)^2}{h^3}$ 为水面坡降，n 为糙率。

干旱和风沙活动的预测

邹学勇：南昌地区风沙化土地风沙地貌发育规模和风沙活动预测。地理研究，1991，10(3)

(1) 灰色动态预测：

设有一原始数列 $X^{(0)}(i) = X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \cdots, X^{(0)}(n)$ 作一次累加生成所建立的预测模型为 $GM(1,1)$，其微分方程形式为：

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = \mu$$

解上式：$x(k+1) = \left[X^{(0)}(1) - \frac{\mu}{a} \right] e^{-ak} + \frac{\mu}{a}$

待定参数向量：$\hat{a} = \left(B^T B\right)^{-1} B^T Y_n$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}\left[X^{(1)}(1) + X^{(1)}(2)\right] & 1 \\ -\frac{1}{2}\left[X^{(1)}(2) + X^{(1)}(3)\right] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}\left[X^{(1)}(n-1) + X^{(1)}(n)\right] & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y_n = \left[X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \cdots, X^{(0)}(n)\right]^T$$

(2) 方差分析：

$$A = \sum_i \sum_j X_{ij}^2$$

$$B = \sum_j \left(\sum_{i=1}^{m_j} X_{ij} \right)^{2/m_j}$$

$$C = \left(\sum_i \sum_j X_{ij} \right)^2 / n$$

构造统计量：

$$F = \frac{(B-C)/(L-1)}{(A-B)/(n-L)}$$

式中，L 为实验周期。

河流运动方向模型

倪晋仁，张仁：河型成因的各种理论及其间关系．地理学报，1991，46(3)

$$\alpha = \omega \sin(2\pi S / M)$$

式中，M 为路径总长；ω 为路径偏离下游方向的最大角度；S 为沿曲线的距离；α 为距离 S 处的路径方向。

现代三角洲岸线变化的预测

钱春林：引滦工程对滦河三角洲的影响 地理学报，1994，49(2)

$$X = \frac{6(P_0 - P)y_1}{\theta h D(10r + 3h\cot\alpha)}$$

$$S = \frac{\theta}{2}\left(2rX - X^2\right)$$

$$a = H'\left[\frac{X + \frac{1}{2}(L-r)}{L-r+X} - \frac{1}{2} \right]$$

$$b = \frac{6(P_0 - P)y_2 + \theta D\left[H'L + 6h(r + h\cot\alpha)\right]X}{2\theta DR(R+L)}$$

式中，X 为现代三角洲海岸的侵蚀速率；S 为三角洲陆上部分的年侵蚀面积；a 为水下岸坡上部的垂直侵蚀速率；b 为水下岸坡下部的垂直堆积速率；P 为滦县站实测年输沙量；P_0 为海洋动力输沙量；y_1、y_2 为分配系数；D 为泥沙比重；L 为水下岸坡平衡点距顶点的距离；θ 为三角洲扇形开张角；α 为海滩坡度；

h 为陆上部分高程；H 为水下三角洲外缘水深；H' 为水下岸坡平衡点水深

海岸线轮廓演化的解析模型

王铮、梅安新：海岸线轮廓演化的解析研究. 地理研究,1994, 13(4)

(1) 海岸轮廓线的演化公式：

$$\frac{\partial y}{\partial t}=\frac{1}{d}\left(\frac{\partial S_t}{\partial a_b}\right)\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

式中，y 为岸线位置；S_t 为体积输沙率；a_b 为外海破波入射角；d 为常数；x 为纵向距离；t 为时间。

(2) 扩散-输送规律方程式：

$$j=-\varepsilon\frac{\partial y}{\partial x}$$

式中，j 为泥沙沿岸流流强。

(3) 岸线演化的地貌过程模式：

1) 海湾：

$$V=\frac{1}{2\varepsilon\sqrt{\pi t^3}}\left[\frac{(\theta-x)^2}{4\varepsilon^2 t}-\frac{1}{2}\right]\times$$

$$\int_{-\infty}^{\infty}\varphi(\zeta)\varphi(\zeta-x)\mathrm{d}\zeta=\frac{(\theta-x)^2-2\varepsilon^2 t}{4\varepsilon^2 t}y$$

式中，V 为岸线冲淤速度；θ 为岸线对称性参数；$\varphi(x)=\exp\left(-x^2/4\varepsilon^2 t\right)$。

2) 曲折岸线：

$$V\equiv\frac{\partial y}{\partial t}=\frac{K\varepsilon}{2\sqrt{\pi t}}\left\{\varphi(x)\left[1+\frac{x^2}{2\varepsilon^2 t}-\varphi(l-x)\right]\times A\right\}+$$

$$\frac{K\varepsilon}{2\sqrt{\pi t^3}}\left[(l-x)^2\varphi(l-x)-x^2\varphi(x)\right]$$

式中，$A=1+\frac{(l-x)^2}{2\varepsilon^2 t}$。

3) 丁坝和港湾：

$$\frac{\partial y}{\partial t}=\frac{\partial y_1}{\partial t}+\frac{\partial y_2}{\partial t}$$

式中，$y_1=\frac{1}{2\varepsilon\sqrt{\pi t}}\int_{-l_1}^{l_2}\varphi(\zeta)\varphi(\zeta-x)\mathrm{d}\zeta$；$y_2=\frac{N}{2\varepsilon\sqrt{\pi t}}\int_{l-d}^{l+d}\varphi(\zeta-x)\mathrm{d}\zeta$；$\frac{\partial y}{\partial t}$ 为淤积速度。

构造运动影响河流纵剖面及河道冲淤的数学模型

贾绍凤：构造运动影响河流纵剖面及河道冲淤的数学模型. 地理学报，1994, 49(4)

(1) 在一维情况下，若没有构造运动，则河床动力学模型为：

$$\frac{\partial(Bhu)}{\partial x}+B\frac{\partial h}{\partial t}=0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+g\frac{\partial(Z_b+h)}{\partial x}+g\frac{u^2}{C^2R}=0$$

$$\frac{\partial(BhuS)}{\partial x}+B\frac{\partial(hS)}{\partial t}+\gamma' B\frac{\partial Z_b}{\partial t}=0$$

$$\gamma'\frac{\partial Z_b}{\partial t}=\alpha w(S-S_*)$$

$$S_*=S_*(u,h,w,\ldots)$$

式中，B 为河宽；h 为平均水深；u 为平均流速；Z_b 为河床平均高程；S 为断面平均含沙量；S_* 为水流挟沙能力；ω 为断面平均泥沙沉速；γ' 为泥沙干容重；g 为重力加速度；R 为水力半径；C 为谢才系数；x 和 t 分别为距离和时间；α 为系数。

(2) 存在构造运动时，设初始时刻 $t=0$ 时的河床高程为 $Z_{b0}(X)=Z_b(x,t)|_{t=0}$；又设从 $t=0$ 到任意时刻的时段内，构造运动累积升降量为 $T(x,t)$，且 $T(x,t)|_{x=0}=0$，$T(x,t)|_{t=0}=0$；泥沙累积淤积厚度为 $Z_s(x,t)$，且 $Z_s(x,t)|_{t=0}=0$，基面变化为 $g(t)$，则，构造运动的河床动力学模型为：

$$\frac{\partial(Bhu)}{\partial x}+B\frac{\partial h}{\partial t}=0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+g\frac{\partial(Z_{b0}+T+Z_s+h)}{\partial x}+g\frac{u^2}{C^2R}=0$$

$$\frac{\partial(BhuS)}{\partial x}+B\frac{\partial(hS)}{\partial t}+\gamma B\frac{\partial Z_s}{\partial t}=0$$

$$\gamma'\frac{\partial Z_s}{\partial t}=\alpha w(S-S_*)$$

$$S_*=S_*(u,h,w,\ldots)$$

(3) 河流纵剖面对构造运动的响应：

在构造运动较弱的情况下：

$$Z_b\approx Z_{b0}+Z_s$$

$$Z_b \approx Z_s$$

在构造运动较显著的情况下：

$$Z_b \approx Z_{b0} + T + Z_s$$

在构造运动强烈的情况下：

$$Z_b \approx Z_{b0} + T$$

$$Z_b \approx T$$

(4) 构造运动 T 与泥沙冲淤 Z_s 的数量关系：
在构造运动较弱的情况下：

$$\frac{\partial(T + Z_s)}{\partial x} = 0$$

由此得：

$$\frac{\partial Z_s}{\partial x} = -\frac{\partial T}{\partial x}$$

$$Z_s = -T$$

在来水来沙、周界条件无趋势性变化的情况下：

$$\frac{\partial \overline{Z_s}}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x}$$

式中，$\overline{Z_s}$ 为平均冲淤量。
对构造运动较弱的一般情况：

$$\frac{\partial(\delta Z_s)}{\partial x} = -\frac{\partial(\delta T)}{\partial x}$$

喀斯特洼地的分形维及其洼地周长与面积计算公式

宋林华，房金福，邓自民等：喀斯特洼地的分形特性研究。地理研究，1995，14(1)

(1) 分形维计算公式：

$$D = 2\frac{\lg L(\delta)}{\lg A(\delta)}$$

式中，D 为分形维；$L(\delta)$ 为平面几何图形的周长；$A(\delta)$ 为面积；δ 为测量单位长度；

(2) 喀斯特洼地周长与面积公式：

$$L(\delta) = C\delta^{(1-D)} \cdot \left(\sqrt{A(\delta)}\right)^D$$

式中，C 为参数。

南极洲纳尔逊冰帽动力学特性的计算公式

王文悌，秦大河，任贾文等：南极洲纳尔逊冰帽的某些动力学特性．地理研究，1995，14(1)

(1) 冰帽表面应变率计算公式：

$$\varepsilon = \frac{1}{\Delta t}\ln\frac{l_2}{l_1}$$

式中，ε 为冰帽表面应变率；l_2，l_1 分别为两点间的最初和最终距离；Δt 为两次测量间的时间间隔。

(2) 冰帽驱动应力计算公式：

$$\tau_{dx} = \frac{u}{x}\rho g H$$

式中，τ_{dx} 为 x 方向低部驱动应力；ρ 为冰的密度；g 为重力加速度；H 为冰厚；u 为沿剖面运动速度。

(3) 冰帽表面平滑了的速度计算公式：

$$V = \frac{2Z^{n+1}}{n+1}\left(\frac{\rho g a}{B}\right)^n$$

式中，V，Z，a 分别为冰帽表面平滑了的速度、厚度和坡度；n、B 为流动参数。

海滨线的后退速率公式

王颖，吴小根：海平面上升与海滩侵蚀．地理学报，1995，50(2)

$$R = \frac{L}{B+h}S$$

或

$$R = \frac{1}{\tan\theta}S$$

式中，R 为海滨线的后退速率；S 为海平面增高；h 为近滨沉积物堆积的水深；L 为海滩至水深 h 间的横向距离；B 为滩肩的高度；$\tan\theta \approx (B+h)/L$ 为沿着横距 L 的近滨平均坡度。

Newman 公式

黄镇国，张伟强，蔡福祥等：华南末次冰期盛期最低海面问题．地理学报，1995，50(5)

$$\Delta H = \frac{(T_w \times 1.03) + (T_s \times 1.9)}{3.4}$$

式中，ΔH 为陆架沉降量(m)；T_w 为海水深度(m)；T_s 为沉积层厚度(m)；1.03 为海水密度；1.9 为沉积物容重；3.4 为地幔密度。

砾石风化圈厚度的估算模型

李保俊，杨景春，李有利等：根据砾石风化圈厚度估算地貌年龄．地理研究，1996，15(1)

(1) 砾石风化与时间的函数关系：

$$r = at^b$$

式中，r 为风化圈厚度；t 为时间；$a = [k/(n-1)]^{1/(n+1)}$、$b = 1/(n+1)$、k、n 为大于0的常数

(2) 张驰法则：

$$C_t = C_\infty - (C_0 - C_\infty)\exp(-t/\tau)$$

式中，C_t 为时间 t 时的砾石风化圈厚度；C_∞ 为砾石风化圈达到平衡状态时的厚度；τ 为张驰时间

黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型

蔡强国，陆兆熊，王贵平：黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型。地理学报，1996，51(2)

(1) 坡面模型：

$$E_w = 0.001\rho gHA\sin\theta$$

式中，E_w 为坡面径流侵蚀力；ρ 为水的密度；g 为重力加速度；$H=(P-F-Z)G\cdot C$ 为平均径流深，P 为降雨量，F 为累积入渗量，G 为与耕作措施实践有关的参数，C 为土壤表土结皮影响参数；A 为单宽汇流面积；θ 为坡度。

$$D_b = 0.015J(E_k/\lambda)\exp(2.68\sin\theta - 0.48C_v)$$

式中，D_b 为坡面溅蚀分散量($kg \cdot m^{-2}$)(当没有细沟发生时，坡面土壤侵蚀量决定于降雨溅蚀分散量和坡面径流搬运能力)；J 为前期表土结皮因子；E_k 为降雨动能($J\cdot m^{-2}$)；$\lambda = ae^{-bM_s}$ 为以标准锥体贯入测量得到的土壤抗剪切强度(kPa)，M_s 为土壤含水量 (%)；θ 为坡度；C_v 为植被覆盖度(%)。

$$(E_{wr}/T)[(I_{30}-F)/(I-F)](\lambda_b/\lambda) > 2.5$$

式中，E_{wr} 为细沟初始发生时临界水流侵蚀力；T 为降雨历时；I 为平均降雨强度；λ 为表土抗剪强度(kPa)；λ_b 为基准状态下的抗剪强度(5kPa)。

(2) 沟坡模型：

$$S_d = 511.07Q_d^{0.865}S_c^{0.114}$$

式中，S_d 为次降雨沟坡的侵蚀产沙模数($t\cdot km^{-2}$)；$Q_d = 0.00502I_{30}^{0.323}E_k^{0.871}Q_c^{0.331}$ 为沟坡径流深(mm)，I_{30} 为峰值降雨强度($mm\cdot hr^{-1}$)，E_k 为降雨能量($J\cdot m^{-2}\cdot mm^{-1}$)，$Q_c$ 为上坡来水量(mm)；S_c 为上部坡面来沙量($t\cdot km^{-2}$)。

$$S_g = 349.324P_a^{-0.631}I_{30}^{0.367}Q_g^{1.054}$$

式中，S_g 为红土沟坡侵蚀模数($t\cdot km^{-2}$)；P_a 为前9天累积降雨量(mm)；I_{30} 为最大30分钟雨强；$Q_g = 0.000\,107E^{1.14}I_{30}^{1.04}P_a^{0.164}$ 为红土沟坡径流深(mm)，E 为降雨能量。

$$S_h = 2284.7Q_h^{0.811}$$

式中，S_h 为陡峭的黄土沟壁侵蚀产沙模数；$Q_h = 0.000\,008\,6I_{30}^{0.854}E^{1.638}$ 为径流深，E 为降雨能量，I_{30} 为最大30分钟雨强。

(3) 沟道模型：

$$S = Y/SDR$$

式中，S 为流域内的侵蚀量；$SDR = 0.027\,7R^{-0.29}\cdot C^{0.19}S_m^{0.59}(E_a/E)^{0.44}$ 泥沙输移比，R 为降雨量，C 为径流系数，S_m 为最大水流含沙量，(E_a/E) 为无量纲雨型因子；Y 为流域出口的产沙量。

递加侵蚀规律模型

马乃喜：黄土地貌演化与土壤侵蚀关系的分析．水土保持通报，1996，16(2)

$$J = Z + D$$

式中，J 为加速侵蚀量；Z 为自然侵蚀量；D 为递加侵蚀量。

风沙二相流运动分析模型

刘大有，董飞，贺大良：风沙二相流运动特点的分析．地理学报，1996，51(5)

(1) 风沙二相流中总剪应力：

$$\tau_{tot} \approx \tau_g^T + \tau_p^{PL} = \rho_g u_*^2$$

式中，τ_{tot} 为风沙二相流中总剪应力；u_* 为摩擦速度；τ_g^T 为湍流剪应力；τ_p^{PL} 为 PL 类剪应力；ρ_g 为气相密度。

(2) 固相 PL 类剪应力：

$$\tau_p^{PL} = mn_A\overline{w}_A(\overline{u}_B - \overline{u}_A)$$

式中，τ_p^{PL} 为固相的 PL 类剪应力；$mn_A\overline{w}_A\overline{u}_A$ 为单位时间内通过单位面积向上运动的颗粒携带的水平动量输运部分；$mn_A\overline{w}_A\overline{u}_B$ 为单位时间内通过单位面积向下

运动颗粒携带的水平动量。

斯特拉勒数学模型

焦峰，李壁成：大岔沟侵蚀地貌分析与治理措施优化配置 水土保持通报，1996，16(6)

$$\frac{V}{HA}=\int_0^1 x\mathrm{d}y$$

$$x=\frac{a}{A}$$

$$y=\frac{h}{H}$$

$$V=\int_b^T a\mathrm{d}h$$

式中，$\frac{V}{HA}$ 为侵蚀积分值；H 为流域地势高差；A 为流域面积；T 为定量；h 为等高线相对高度；a 为等高线所切水平断面面积；V 为被侵蚀掉的物质体积。

扩散模拟型流域地貌汇流模型

冼平，梁瑞驹：扩散模拟型流域地貌汇流模型。地理学报，1997，52(4)

(1) 扩散模拟河段：

$$D\frac{\partial^2 Q}{\partial L^2}-C\frac{\partial Q}{\partial L}=\frac{\partial Q}{\partial t}$$

上式为泛定方程，C 和 D 为常数，且：

$Q(L,0)=0$ （初时条件，$L>0$）

$Q(0,t)=I(t)$ （上边界条件，$t>0$）

$\lim\limits_{L\to\infty}Q(L,t)=0$ （自由下边界，$t>0$）

式中，$Q(L,t)$ 为流量；L 为距离；t 为时间；C 和 D 分别为洪水波的波速和扩散系数；$I(t)$ 为河段上段面的入流过程。当 $I(t)$ 为瞬时脉冲函数 $\delta(t)$ 时，$Q(L,t)$ 即为"扩散模拟河段"的响应函数 $h(t)$，即：

$$h(t)=\frac{L}{\left(4\pi Dt^3\right)^{\frac{1}{2}}}\cdot\exp\left[-\frac{(L-Ct)^2}{4Dt}\right]$$

(2) 三级流域瞬时单位线：

$$h_3(t)=\frac{\Phi_1 P_{12}\left(\bar{L}_1+\bar{L}_2+\bar{L}_3\right)}{\left(4\pi Dt^3\right)^{\frac{1}{2}}}\cdot\exp\left(-\frac{\left(\bar{L}_1+\bar{L}_2+\bar{L}_3-Ct\right)^2}{4Dt}\right)+$$

$$\frac{\Phi_1 P_{13}\left(\bar{L}_1+\bar{L}_3\right)}{\left(4\pi Dt^3\right)^{\frac{1}{2}}}\cdot\exp\left(-\frac{\left(\bar{L}_1+\bar{L}_3-Ct\right)^2}{4Dt}\right)+$$

$$\frac{\Phi_2\left(\bar{L}_2+\bar{L}_3\right)}{\left(4\pi Dt^3\right)^{\frac{1}{2}}}\cdot\exp\left(-\frac{\left(\bar{L}_2+\bar{L}_3-Ct\right)^2}{4Dt}\right)+$$

$$\frac{\Phi_3\bar{L}_3}{\left(4\pi Dt^3\right)^{\frac{1}{2}}}\cdot\exp\left(-\frac{\left(\bar{L}_3-Ct\right)}{4Dt}\right)$$

式中，$\bar{L}_i$ 为 i 级河流的平均长度；Φ_i 为初时概率(i 级单元面积与全流域面积的比值)；P_{ij} 为转移概率(注：j 级河流的 i 级河流数与 i 级河流总数的比值)。

它们均可以写成 Horton 地貌率理论中河长比 R_L，河流分叉比 R_B，面积比 R_A 的函数，即：

$$\bar{L}_i=\bar{L}_3\cdot R_L^{\,i-3}$$

$$P_{12}=\frac{R_B^{\,2}+2R_B-2}{2R_B^{\,2}-R_B}$$

$$P_{13}=\frac{R_B^{\,2}-3R_B+2}{2R_B^{\,2}-R_B}$$

$$\Phi_1=\frac{R_B^{\,2}}{R_A^{\,2}}$$

$$\Phi_2=\frac{R_B}{R_A}-\frac{R_B^{\,3}+2R_B^{\,2}-2R_B}{R_A^{\,2}(2R_B-1)}$$

$$\Phi_3=1-\frac{R_B}{R_A}-\frac{R_B^{\,3}-3R_B^{\,2}+2R_B}{R_A^{\,2}(2R_B-1)}$$

(3) 时段转换：扩散模拟型流域瞬时单位线在应用时，需要经 S 曲线转化为时段单位线。对三级流域，其瞬时单位线 $h_3(t)$ 的 S 曲线 $S_3(t)$ 为

$$S_3(t)=\Phi_1 P_{12}\cdot SH\left(\bar{L}_1+\bar{L}_2+\bar{L}_3,t\right)+$$

$$\Phi_1 P_{13}\cdot SH\left(\bar{L}_1+\bar{L}_2,t\right)+$$

$$\Phi_2\cdot SH\left(\bar{L}_2+\bar{L}_3,t\right)+$$

$$\Phi_3\cdot SH\left(\bar{L}_3,t\right)$$

式中，

$SH(L,t)=\frac{1}{2}\left(A+\exp\frac{CL}{D}\right)\left(1-\mathrm{erf}\frac{L+Ct}{2(Dt)^{\frac{1}{2}}}\right)$，exp(*) 为指数函数，erf(*) 为误差函数，$A=\left[1-\mathrm{erf}\frac{L-Ct}{2(DT)^{\frac{1}{2}}}\right]$。

根据 S 曲线与时段单位曲线的关系，可求出三级流域的时段单位线：

$$UH_3(t)=\frac{1}{\Delta t}\left[S_3(t)-S_3(t-\Delta t)\right]$$

(4) 矩法：根据矩的定义，可求出三级流域瞬时单位线 $h_3(t)$ 的一阶原点矩 M_h、二阶中心矩 N_h 分别为：

$$M_h=\Phi_1P_{12}\frac{\bar{L}_1+\bar{L}_2+\bar{L}_3}{C}+\Phi_1P_{13}\frac{\bar{L}_1+\bar{L}_3}{C}+\Phi_2\frac{\bar{L}_2+\bar{L}_3}{C}+\Phi_3\frac{\bar{L}_3}{C}$$

$$N_h=\Phi_1P_{12}\frac{2D(\bar{L}_1+\bar{L}_2+\bar{L}_3)}{C}+\Phi_1P_{13}\frac{2D(\bar{L}_1+\bar{L}_3)}{C}+\Phi_2\frac{2D(\bar{L}_2+\bar{L}_3)}{C}+\Phi_3\frac{2D\bar{L}_3}{C}$$

令：$G=\Phi_1P_{12}(\bar{L}_1+\bar{L}_2+\bar{L}_3)+\Phi_1P_{13}(\bar{L}_1+\bar{L}_3)+\Phi_2(\bar{L}_2+\bar{L}_3)+\Phi_3\bar{L}_3$，并将入流 $I(t)$、出流 $Q(t)$ 和瞬时单位线 $h(t)$ 三者之间的矩值关系 $M_h=M_Q-M_I$ 和 $N_h=N_Q-N_I$ 代入上列各式可得：

$$C=\frac{G}{M_Q-M_I}$$

$$D=\frac{G^2(N_Q-N_I)}{2(M_Q-M_I)}$$

式中，M_Q 和 M_I 分别为出流 $Q(t)$ 和入流 $I(t)$ 的一阶原点矩；N_Q 和 N_I 分别为出流 $Q(t)$ 和入流 $I(t)$ 的二阶中心矩。

(5) 内罚函数法：内罚函数法是一种有约束的最优化方法，用此法估计模型参数 C 和 D 时，其目标函数和约束条件为：

$$\min f(C,D)=\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}\left[\left(Q_{i,实}-Q_{i,计}\right)\frac{Q_{i,实}}{Q_{m,实}}\right]^2+r\left(\frac{1}{C}+\frac{1}{D}+\frac{1}{C_{\max}-C}\right)$$

$$(0\leqslant C\leqslant C_{\max}\ ,\ D>0)$$

式中，$Q_{i,实}$ 和 $Q_{i,计}$ 分别为各离散点的实测流量值和计算流量值；$Q_{m,实}$ 为实测洪峰值；$C_{\max}=1.5u_{\max}$，$u_{\max}$ 为流域出口断面平均流速最大值；M 为本次洪水的计算时段数；r 为内罚因子。

河流形态的分维计算

冯平，冯焱：河流形态特征的分维计算方法．地理学报，1997，52(4)

(1) 河长：对于 Ω 级河流，根据 Horton 河系定律，可得流域河长为：

$$L(\varepsilon)=\sum_{k=1}^{\Omega}L_k(\varepsilon)=\frac{L_1(\varepsilon)\left(R_L^{\ \Omega}-1\right)}{R_L-1}$$

$$d=\frac{2\lg\frac{R_L^{\ \Omega}-1}{R_L-1}}{(\Omega-1)\lg R_A}$$

当 $\varepsilon\to0$ 时，$\Omega\to\infty$，并考虑到 $d>1$，则有：

$$d=\max\left\{1,\frac{2\lg R_L}{\lg R_A}\right\}$$

式中 L_k 为 K 级河流的平均河长；R_B，R_L 和 R_A 分别为河流分枝比、长度比和面积比；Ω 为河流的最高级。

(2) 河网：河网的形态特征一般用河网密度来表示，它是河网的干支流总长度与流域面积的比值：

$$D=\frac{\lg R_B}{\lg R_L}$$

考虑到 $D>1$，则有：

$$D=\max\left\{1,\frac{\lg R_B}{\lg R_L}\right\}$$

式中 R_B，R_L 分别为河流分枝比、长度比。

河口自动调整及地貌解释

李春初：论河口体系及其自动调整作用．地理学报，1997，52(4)

(1) 河流优势型河口的自动调整作用：

$$F' = \frac{U}{(\gamma g h')^{\frac{1}{2}}}$$

式中，F' 为密度佛汝得数；U 为分层流上层流出水的平均流速；g 为重力加速度；h' 是密度界面深度；γ 为上下层水密度的比率。

(2) 波浪优势型河口的自动调整作用：

$$I = \frac{PR_t}{gbT_w T_t H_0^2}$$

式中，I 为门门附近波能和潮汐能的相对强弱；P 为潮棱体；R_t 为潮差；g 为单位物质水的质量；b 为通道宽度；T_w 为波周期；T_t 为潮周期；H_0 为波高。

泥石流的结构两相流模型的理论表达

倪晋仁，王光谦：泥石流的结构两相流模型：I.理论．地理学报，1998，53(1)

(1) 质量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(C_k \rho_k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(C_k \rho_k u_{ki}) = 0$$

式中，$k = 1,2$ 分别代表固相和液相；ρ_k 为 k 相密度；C_k 为 k 相的体积分数，$\sum_{k=1}^{2} C_k = 1$；u 为速度。

(2) 动量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(C_k \rho_k u_{ki}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(C_k \rho_k u_{ki} u_{kj}) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(C_k P_k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(C_k T_{kij}) + C_k \rho_k g_{ki} + M_{ki}$$

式中，P 为压力；T 为应力张量；g 为单位质量的外力；M 为单位体积上相间相互作用力(或动量传递项)。

(3) 能量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[C_k \rho_k (e_k + \frac{1}{2} u_{ki} u_{kj})\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[C_k \rho_k (e_k + \frac{1}{2} u_{ki} u_{kj}) u_{kj}\right] = -\frac{\partial C_k q_{ki}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(C_k P_{kij} u_{ki}) + C_k \rho_k g_{ki} u_{ki} + C_k Q_k + C_k E_k$$

式中，e 为内能；q 为能量通量；Q 为体能源项；E 为碰撞源项；$P_{kij} = T_{kij} - P_k \delta_{ij}$ 为 K 相的应力张量，δ_{ij} 为单位张量。

(4) 固、液各相的应力结构关系：

$$T_k = T_k^1 + T_k^2$$

式中，T 右上角“1”和“2”分别表示与切变速率无关部分和与切变速率有关部分；$k = p, f$ 分别表示颗粒相和液相。

泥石流的结构两相流模型

倪晋仁，王光谦，熊育武等：泥石流的结构两相流模型：II.应用．地理学报，1998，53(1)

(1) 黏性泥石流运动中单位体积上相间作用力的 Stokes 阻力表达形式：

$$M_{px} = -M_{fx} = -\frac{18\mu\lambda}{D^2(u_f - u_p)}$$

式中，M_{px} 和 M_{fx} 分别为作用于颗粒相或液相的单位体积上的相间作用力；μ 为液相黏滞系数；D 为颗粒粒径；u_f 和 u_p 分别为液相与固相速度；λ 为与颗粒浓度相关的修正系数。

(2) 黏性泥流在二维稳定均匀流条件下的应力关系：

$$T_{mxy} \approx T_{fxy} = \tau_B + \mu \frac{du_f}{dy}$$

式中，T_{mxy} 和 T_{fxy} 分别表示泥流沿流动方向的总应力和“液相”应力；τ_B 为宾汉极限应力；μ 为泥流的液相黏滞系数；u_f 为泥流沿 y 向任一点的液相速度。

(3) 水石流的极限速度分布表达式：

$$\frac{u}{u_{max}} = \left(2 - \frac{y}{H}\right)\left(\frac{y}{H}\right)^2$$

式中，$\frac{y}{H}$ 为从床面计起的垂直床面向上的相对坐标；u 为颗粒速度，下标“max”代表对应变量沿整个流深的最大值。

采煤塌陷地动态演变规律分析模型

方创琳，毛汉英：兖滕两淮地区采煤塌陷地的动态演变规律与综合整治．地理学报，1998，53(1)

(1) 地表任意点 $P(x, y)$ 的下沉值：

$$TH_{p(x,y)} = \frac{1}{TH_0} TH(x) \cdot TH(y)$$

式中，$TH(x)=\frac{TH_0}{2}\left(\int_0^{\sqrt{\pi}\frac{x}{r_1}}e^{-t^2}\mathrm{d}t-\int_0^{\sqrt{\pi}\frac{x-L}{r_2}}e^{-t^2}\mathrm{d}t\right)$ 为坐标 x 的地面点 P 的下沉值；

$TH(y)=\frac{TH_0}{2}\left(\int_0^{\sqrt{\pi}\frac{y}{r_1}}e^{-t^2}\mathrm{d}t-\int_0^{\sqrt{\pi}\frac{y-L}{r_2}}e^{-t^2}\mathrm{d}t\right)$ 为沿 y 方向的地表下沉值； TH_0 为充分采动条件下最大下沉值；r 为主要影响半径；L 为工作面长度的水平投影。

(2) 流体力学理论支持下采煤塌陷地动态演变的基本规律：

$$TP(x,y,o)=TS(x,y,o)+TV(x,y,o)+TH(x,y,o)$$

$$TS(x,y,o)=-4\Delta h/\pi^2\times$$

$$\iint_0^{\infty}\frac{h_i\mathrm{sh}\rho h_i(\rho h_{i+1}\mathrm{ch}\rho h_{i+1}+\mathrm{sh}\rho h_{i+1})B}{[(\mathrm{sh}\rho h_i\mathrm{ch}\rho h_i+\rho h_i)(\mathrm{sh}\rho h_{i+1}\mathrm{ch}\rho h_{i+1}+\rho h_{i-1})+A]\eta}$$

式中，$A=\frac{G_i(1-\gamma_{i+1})}{G_{i+1}(1-\gamma_i)}(\mathrm{sh}^2\rho h_i-\rho^2\eta^2)\mathrm{sh}^2\rho h_{i+1}$；

$$B=\sin\xi L_1\sin\eta L_2\sin\xi x\cos\eta y\,\mathrm{d}\xi\,\mathrm{d}\eta$$

$$TV(x,y,o)=-4\Delta h/\pi^2\times$$

$$\iint_0^{\infty}\frac{h_i\mathrm{sh}\rho h_i(\mathrm{sh}\rho h_{i+1}+\rho h_{i+1}\mathrm{ch}\rho h_{i-1})C}{[(\mathrm{sh}\rho h_i\mathrm{ch}\rho h_i+\rho h_i)(\mathrm{sh}\rho h_{i+1}\mathrm{ch}\rho h_{i+1}+\rho h_{i-1})+D]\xi}$$

式中，$C=\sin\xi L_1\sin\eta L_2\cos\xi x\sin\eta y\,\mathrm{d}\xi\,\mathrm{d}y$；

$$D=\frac{G_i(1-\gamma_{i+1})}{G_{i+1}(1-\gamma_i)}(\mathrm{sh}^2\rho h_i-\rho^2h_i^2)\mathrm{sh}^2\rho h_{i+1}$$

$$TH(x,y,o)=-4\Delta h/\pi^2\times$$

$$\iint_0^{\infty}\frac{(\mathrm{sh}\rho h_i+\rho h_i\mathrm{ch}\rho h_i)EF}{[(\mathrm{sh}\rho h_i\mathrm{ch}\rho h_i+\rho h_i)G+H]\xi\eta}\mathrm{d}\xi\,\mathrm{d}\eta$$

式中，$E=\mathrm{sh}\,\rho h_{i+1}\mathrm{ch}\rho h_{i+1}+\mathrm{sh}\,\rho h_{i-1}$；

$$F=\sin\xi L_1\sin\eta L_2\cos\xi x\cos\eta y；$$

$$G=\mathrm{sh}\rho h_{i+1}\mathrm{ch}\rho h_{i+1}+\rho h_{i+1}；$$

$H=\frac{G_i(1-\gamma_{i+1})}{G_{i+1}(1-\gamma_i)}(\mathrm{sh}^2\rho h_i-\rho^2h_i^2)\mathrm{sh}^2\rho h_{i+1}$ $TS(x, y, o)$、$TV(x, y, o)$ 和 $TH(x, y, o)$ 分别为地面沉陷中任意点 $P(x, y, o)$ 的水平移动分量；$TP(x,y,o)$ 为 $P(x,y,o)$；h_i，h_{i+1} 分别表示第 i 层和第 i 层的下一层厚度；Δh 为开采厚度；L_1、L_2 分别表示矩形工作面的走向长度和倾向长度；G_i、γ_i 分别表示覆盖岩层第 i 层剪切模量和泊松比；G_{i-1}、γ_{i+1} 分别表示第 i 层下一层剪切模量和泊松比；ζ，η 为积分变量，且 $\rho=\sqrt{\xi^2+\eta^2}$；x、y 为开采工作面有效角点坐标。

分形布朗地貌演化方程

艾南山，朱治军，李后强：外营力地貌作用随机特性和分形布朗地貌的稳定性. 地理研究，1998，17(1)

(1) 第一类过程：

$$\frac{\partial H(x,t)}{\partial t}=K_1[C_0+C(x,\alpha)]，\quad H(x,0)=H_0(1)$$

式中，$H(x,t)$ 为 t 时刻的地貌面高度值；K_1 为常系数；C_0 为一负常数；$C(x,\alpha)$ 为服从 Hurst 指数为 α 的分形布朗运动。

(2) 第二类过程：

$$\frac{\partial H(x,t)}{\partial t}=K_1[C_0+C(x,\alpha)]+K_2\left\{\frac{1}{2}[H'(x+0,t)-H'(x-0,t)]\right\}$$

$$H(x,0)=H_0$$

沟壑密度计算公式

张丽萍，马志正：流域地貌演化的不同阶段沟壑密度与切割深度关系研究. 地理研究，1998，17(3)

$$D=\frac{L}{A}=\cot\theta\int_{h_0}^{h_{\max}}\frac{\mathrm{d}h}{(h\cot a+c)^2}$$

式中，D 为单位面积上沟道长度；L 为整个流域沟道总长度；A 为流域面积；θ 为地面坡度；h 为切割深度；$h_{\max}$、h_0 分别为切割深度上限、下限；a 为沟道最窄处的二分之一；c 为沟道平均宽度的二分之一。

崇明岛发育长度的理论公式

高进：长江河口的演变规律与水动力作用. 地理学报，1998，53(3)

$$l=\frac{S}{\sqrt{\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^4\left(\frac{b_1}{b_2}\right)^{10}-1}}$$

式中 b_1，b_2 分别为主流与北支的平均宽度；Q_1、Q_2 分别为河道的总流量、北支的流量；S 为一长度参数。

Bruun 模式

陈西庆，陈吉余：长江三角洲海岸剖面闭合深度的研究. 地理学报，1998，53(4)

$$R = \frac{L_*}{B+h_*} \cdot S$$

或

$$R = \frac{1}{\tan\theta} \cdot S$$

式中，R 为岸线后退速率；S 为海平面上升量；h_* 为近岸沉积物(区别于细颗粒陆架沉积物)分布的水深限度；L_* 为从水深 h_* 到岸线的距离；B 为滩肩高度(或其他侵蚀区高程估计)；$\tan\theta = [(B+h_*)/L_*]$ 为近岸平均坡度。

风蚀流失量模型

董治宝：建立小流域风蚀量统计模型初探。水土保持通报，1998，18(5)

$$Q = \int_T \int_x \int_y 3.90(1.0413 + 0.0441\theta + A)B\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y\,\mathrm{d}t$$

式中，$A = 0.0021\theta^2 - 0.0001\theta^3$；$B = \dfrac{V^2(8.2\times10^{-5})^{V_{CR}} S_{DR}^2}{(H^8 d^2 F)_{x,y,z,t}}$

Q 为风蚀流失量；V 为风速；H 为空气相对湿度；θ 为坡度；V_{CR} 为植被盖度；S_{DR} 为人为地表结构破损率；d 为颗粒平均粒径；F 为土体硬度；x，y，z 为距参照点距离；t 为时间。

蚀退模式和演变趋势分析

虞志英，樊社军，金镠：江苏北部废黄河口水下三角洲稳定性和深水港建设。地理学报，1998，53(增刊)

(1) 浅滩的侵蚀冲刷率：

$$\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t} = \begin{cases} M\left[\left(\dfrac{U_{*0\cdot w}}{U_{*c}}\right)^2 - 1\right] & (U_* > U_{*c}) \\ 0 & (U_* < U_{*c}) \end{cases}$$

式中，m 为单位面积上的冲刷量($\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$)；M 为冲刷系数($\mathrm{kg\cdot m^{-3}\cdot s^{-1}}$)；$U_*$ 为摩阻流速；U_{*c} 为临界冲刷切速；$U_{*0.w}$ 为波浪切速峰值。

(2) 浅滩的冲刷模式：

$$E = \int_0^t \int_0^\infty f_c\, M\left[\left(\frac{U_{*o\cdot w}}{U_{*c}}\right)^2 - 1\right] f(H)\,\mathrm{d}t\,\mathrm{d}H$$

$$Z = Z_0 - E(x,t)/\gamma$$

$$f_c = \begin{cases} 0 & (U_{*0\cdot w} < U_{*c}) \\ 1 & (U_{*0\cdot w} > U_{*c}) \end{cases}$$

式中，γ 为沉积物干容重。

(3) 全潮周期的侵蚀量：

$$\mathrm{d}E = M\left[\left(\frac{U_{*o\cdot f}}{U_{*c}}\right) - 1\right]\left[\left(\frac{U_{*o\cdot f}}{U_{*c}}\right)\right] T$$

式中，T 为潮流周期；$M = 5.97\times10^{-2}\ \mathrm{kg\cdot m^{-3}\cdot s^{-1}}$。

自然地理界线划分的可拓工程方法计算公式

晏路明：可拓工程方法在自然地理界线划分中的应用。地理研究，1999，(1)

(1) 经典域、节域和待判物元的计算公式：
设 P ={中亚热带→南亚热带}，P_0={南亚热带}，则 $P_0 \subset P$，对任何 $p \in P$，试判断 P 是否属于 P_0，并计算 P 属于 P_0 的程度。

1) 经典物元：

$$R_0 = \begin{bmatrix} P_0 & c_1 & V_{01} \\ & c_2 & V_{02} \\ & c_3 & V_{03} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_0 & c_1 & \langle a_{01}, b_{01}\rangle \\ & c_2 & \langle a_{02}, b_{02}\rangle \\ & c_3 & \langle a_{03}, b_{03}\rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_0 & c_1 & \langle 6500, 8000\rangle \\ & c_2 & \langle 10, 15\rangle \\ & c_3 & \langle 0, 5\rangle \end{bmatrix}$$

2) 节域物元：

$$R_p = \begin{bmatrix} P & c_1 & V_{p1} \\ & c_2 & V_{p2} \\ & c_3 & V_{p3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & c_1 & \langle a_{p1}, b_{p1}\rangle \\ & c_2 & \langle a_{p2}, b_{p2}\rangle \\ & c_3 & \langle a_{p3}, b_{p3}\rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & c_1 & \langle 5300, 8000\rangle \\ & c_2 & \langle 4, 15\rangle \\ & c_3 & \langle -6, 5\rangle \end{bmatrix}$$

3) 待判物元：

$$R_x = \begin{bmatrix} P & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & c_3 & v_3 \end{bmatrix}$$

(2) 样本 P 与 P_0 的单指标关联函数计算公式：

$$K_i(v_i)=\begin{cases}\dfrac{-\rho(v_i,V_{0i})}{|V_{0i}|} & (v_i\in V_{0i})\\[2ex] \dfrac{\rho(v_i,V_{pi})}{\rho(v_i,V_{pi})-\rho(v_i,V_{0i})} & (v_i\bar{\in} V_{0i})\end{cases}$$

式中，$\rho(v_i,V_{0i})=|v_i-(a_{0i}+b_{oi})/2|-(b_{0i}-a_{0i})/2$，$\rho(v_i,V_{pi})=|v_i-(a_{pi}+b_{pi})/2|-(b_{pi}-a_{pi})/2$，$(i=1,2,3)$

(3) 样本 P 与 P_0 的多指标关联函数计算公式：

$$K(p)=\sum_{i=1}^{3}\lambda_i K_i(v_i)$$

式中，$K(p)$ 为 P 属于 P_0 的程度，当 $K(p)>0$ 时，$p\in P_0$；当 $-1\leqslant K(p)\leqslant 0$ 时，$p\in P$，$p\bar{\in} P_0$；当 $K(p)\leqslant -1$ 时，$p\bar{\in} P_0$。

区域风沙蚀积量和蚀积强度分析模型

刘连友：区域风沙蚀积量和蚀积强度初步研究.地理学报，1999,54(1)

(1) 区域风沙蚀积量基础模型：

$$W_e=M_o-M_i$$

式中，M_i 为某一时段风沙物质的输入量；M_o 为边界风沙输出量；W_e 为区域物质蚀积平衡。

(2) 蚀积强度基础模型：

$$R_e=W_e/S$$

式中，S 为区域面积；R_e 区域蚀积速率或强度。

(3) 输沙量模型：

$$Q_i=\sum q_iT_i$$

式中，Q_i 为输沙量；q_i 为受风速和下垫面制约的输沙率；T_i 为不同风力起沙风的持续时间。

流域沟壑密度理论极值数学模式

蒋忠信：流域沟壑密度理论极值数学模式商讨.地理研究，1999，18(2)

(1) 沟道最宽处的半宽计算公式：

$$b=\frac{\sqrt{3}}{3}\left(2-\sqrt{3}\right)h\cot\theta+\frac{2}{3}\sqrt{3}\alpha$$

式中，b 为沟道最宽处的半宽；h 为切割深度；θ 为地面坡度；α 为沟道最窄处的半宽。

(2) 沟壑密度理论极值的正六边形数学模式：

$$D=\frac{1}{h_0\cot\theta+\alpha}-\frac{1}{h_{\max}\cot\theta+\alpha}$$

式中，D 为沟壑密度理论极值；$h_{\max}$、h_0 分别为切割深度的最大最小值。

河谷地貌特征指标

马保起，李克，吴卫民等：大青山河谷地貌特征及新构造意义.地理学报，1999，54(4)

(1) 河谷纵剖面：

$$h/H=(l/L)^n$$

式中，L 和 H 分别为整条河谷的水平长度和落差；l 和 h 为河谷纵剖面上某点与河口的水平距离和落差；$n(>0)$ 为形态指标。

(2) 河口 V_f 指标：

$$V_f=2V_{fw}/[(E_{ld}-E_{sc})+(E_{rd}-E_{sc})]$$

式中，V_{fw} 为谷底宽度；E_{ld} 和 E_{rd} 分别为谷地两侧分水岭海拔高度；E_{sc} 为谷底海拔高度。

珠江三角洲海平面上升对堤围影响的分析公式

黄镇国，张伟强，赖冠文等：珠江三角洲海平面上升对堤围防御能力的影响.地理学报，1999，54(6)

(1) 各站高潮水位台升幅度：

$$Z_2=C_1Z_1+\beta Q-\alpha Z_1Q+C_2$$

$$\Delta Z_2=(C_1-\alpha Q)\Delta Z_1$$

式中，Z_1 为三灶站高潮位；ΔZ_1 为三灶站海平面升幅；Z_2 为各站高潮位；ΔZ_2 为各站海平面升幅；Q 为马口站流量；α 和 β 为斜率；C_1 和 C_2 为常数。

(2) 堤围加高加固工程量：

$$\Delta V=(0.25\Delta h^2+0.1\Delta h\cdot b+0.5\Delta h\cdot h)L$$

式中，ΔV 为变海平面上升影响的堤围维护工程量；L 为堤围长度；Δh 为堤围需加高的幅度；h 为原堤围高度；b 为原堤围顶宽度。

危险度分区界线值计算

唐川，朱静：澜沧江中下游滑坡泥石流分布规律与危险区划.地理学报，1999，54(增刊)

(1) 中心线：

$$CL=\frac{1}{M}\sum D_m$$

式中，$D_m=\frac{1}{N}\sum X_{(i,j)}n$ 为统计单元均数；m 为各统计单元的总编号数；M 为统计单元总数；N 为各单元评价指标总数；CL 为中心线值。

(2) 上分界线：

$$UCL=\frac{1}{M}\sum D_m+\frac{A}{M}\sum R_m$$

式中，A 为系数；$R_m=\max X_{(i,j)}-\min X_{(i,j)}$；$UCL$ 为上分界线值。

(3) 下分界线：

$$LCL=\frac{1}{M}\sum D_m-\frac{A}{M}\sum R_m$$

式中，LCL 为下分界线值。

地震应急需求的概念模型

聂高众，高建国，苏桂武等：地震应急救助需求的模型化处理－－来自地震震例的经验分析。资源科学，2001，22(1)

$$Y=K_xQ_xF_x-\delta C_y$$

式中，Y 为某种救灾物资或救灾队伍的实际最小需求量；K_x 为灾区本身的地区系数；Q_x 为气候系数；F_x 为某种救灾物资或救灾队伍的理论统计需求量；δ 为地震后保全率；C_y 为灾区本身该类救灾物资或救灾队伍的现有数量。

水流最小消耗能原理

严宝文，包忠谟：均衡纵剖面形态的实验研究。水土保持通报，2000，20(1)

$$熵生率=\mathrm{d}p/\mathrm{d}t$$

水滴的能量方程：$E_{势}=E_{动}+W$。

假定 A,B 位置已定，则 $E_{势}$ 就是定值，而水滴运动的最终目的就是使 W 最小，W 的计算公式可以表达为：

$$W=\int_A^B f\,\mathrm{d}s$$

式中，f 为摩擦力；s 为弧长。

第九章 土　壤

侵蚀模数等值线校核计算公式

[illegible]流域侵蚀模数等值线的编制和分析．地理学报，1958，24(4)

(1) 侵蚀模数：

$$M = \frac{R}{F}$$

或

$$M = \frac{31500P}{F}$$

式中：M 为侵蚀模数亦称输沙量率($t \cdot km^{-2}$)；R 为输沙总量(t)；F 为集水面积(km^2)；P 为年平均输沙率($kg \cdot y^{-1}$)。

(2) 侵蚀深度：

$$\Delta h = \frac{0.001M}{r}$$

式中，M 为侵蚀模数($t \cdot km^{-2}$)；r 为当地的泥沙平均单位体积重量(即干容重)($t \cdot m^{-3}$)。

(3) 侵蚀系数：

$$\alpha = \frac{\rho}{10\sqrt{I}}$$

式中，α 为侵蚀系数；ρ 为年平均含沙量($kg \cdot m^{-3}$)；I 为河流的比降。

(4) 等值线的平衡校核计算公式：

$$\overline{M} = \frac{1}{F}\left(f_1 \frac{m_1 + m_2}{2} + f_2 \frac{m_2 + m_3}{2} + \cdots + f_n \frac{m_n + m_{n+1}}{2} \right),$$

式中，$\overline{M}$ 为平衡量算得的区间模数值；$f_1, f_2, \cdots, f_n$ 为等值线间的部分面积；F 为部分面积之和($f_1 + f_2 + \cdots + f_n$)；$m_1, m_2, \cdots, m_{n+1}$ 为等值线代表的模数值。

土壤热量交换强度计算公式

么大康，徐兆生，王继琴：华北平原地区土壤中热量交换．地理学报，1962，28(1)

$$A = \frac{C}{\tau}\left(S_1 - \frac{K}{10} S_2 \right)$$

式中，A 为土壤中热量交换强度($cal \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$)；$\tau$ 为计算的某一时间间隔(min)；C 为土壤容积热容量($cal \cdot cm^{-3} \cdot ℃^{-1}$)；$K$ 为导温系数($cm^2 \cdot min^{-1}$)；S_1 为各深度温度梯度分布代数和($℃ \cdot cm^{-1}$)；S_2 为10~20cm 层温度梯度在相邻时间内温度差代数和($℃ \cdot min^{-1}$)。

土壤水分平衡公式

黄秉维：从自然地理学、土壤水分平衡谈到J.C.威尔科克斯的四篇论文．地理学报，1963．29(4)

$$(r + i_1 + i_2 + i_3) - (f + E - e_2 + e_3 + e_4) = (w_1 + w_2) + (c_1 + c_2)$$

式中，r 为降水；i_1 为由大气进入土中的水汽；i_2 为由下层进入土中的水汽；i_3 为由下层进入土中的悬着水；f 为坡面径流；E 为蒸腾和土面蒸发(即陆面蒸发，在没有植物生长时，陆面蒸发只包括土面蒸发)；e_2 为由土层输送至下层的水汽；e_3 为由土层输送至下层的悬着水；e_4 为由土层排至下层的重力水；w_1 为植物体及土壤表面所截留的水分；w_2 为土壤含水量的变化；c_1 为进入植物体中成为其组成部分的水分；c_2 为与土中矿质及有机质结合的水分。

土壤湿度及其他环境因子的估算模型

Buckingham F M, Woods F W：土壤湿度和其他环境因素影响下的火炬松．Journal of Applied Ecology, 1969, 6(1)

(1) 土壤湿度的估算：

$$M_t = M_t - E_t + P_t - \varepsilon_{excess}$$

式中，M_t 是在时间 t 土壤的湿度；E_t 是土壤水分蒸发蒸腾损失总量；P_t 是自从前一时期以来的降水量，只有当计算的土壤的湿度超过湿度容量时，才会降水过量。

(2) 每天土壤水分蒸发蒸腾损失总量（E_t）的估算：

$$E_t = \frac{M'_{t-1}}{S}(PE)$$

式中，M'_{t-1} 表示前一天结束时质层上的土壤湿度；S 是同一土层总的湿度容量；PE 是潜在土壤水分蒸发蒸腾损失总量。

(3) 每年早材体积的回归模型：

$$Y = 0.1412 - 0.002683X_1 - 0.00000488X_2 - 0.002127X_3 + 0.0002132X_4 - 0.0009218X_5$$

式中，Y 是每年早材体积的倒数；X_1 是 6 月平均温度；X_2 是 5 月温度不足；X_3 是去年 10 月的平均温度；X_4 是去年 11 月的日照百分比；X_5 是 3 月的平均温度。

潜在的土壤水分蒸发蒸腾损失总量计算公式

Davis N E: 最优夏季指数和平均潜在的水亏缺. Journal of Applied Ecology, 1970, 7(2)

(1) Turc 的潜在土壤水分蒸发蒸腾损失总量 E_{pot} 公式：

$$E_{pot} = \frac{P+80}{\sqrt{1+\left(\frac{P+10}{L}+\frac{70}{2L}\right)^2}} \quad (L>10)$$

$$E_{pot} = \frac{P+10}{\sqrt{1+\left(\frac{P+10}{L}\right)^2}} \quad (L<10)$$

式中，P 是总降水量；$L=(t+2)\sqrt{i}/16$；t 是平均温度；i 是总收入的辐射。

(2) Thornthwaite 公式 (1948)：

$$e = 1.6\left(\frac{10t}{Q}\right)^a$$

式中，e 是潜在土壤水分蒸发蒸腾损失总量；t 是本时期的平均温度；$a=0.000000675\,Q^3-0.0000771\,Q^2+0.01792Q+0.4923$，并且 $Q=\sum(T_m/5)^{1.514}$，T_m 是每月平均温度，总和是 12 个月的温度。

(3) 实际公式为：

$$e = 13.5\left(\frac{t}{26.5}\right)^{\lg\frac{1.6}{13.5}/\lg\frac{Q/10}{26.5}} \quad (t \leqslant 26.5)$$

(4) 潜在水分亏缺 d 的估算：

$$d^{\frac{1}{2}} = 99\times10^{-4}I - 5.3$$

式中，$I=10T_x+20S-7R$，T_x 是平均每日最高温；S 是平均每日日照(h)；R 是总降水量。

土壤覆盖热效应分析公式

陈发祖：土壤覆盖热效应的微气象研究. 地理学报，1980, 35(1)

(1) 覆盖土壤的热量平衡方程为：

$$R = H + LE + G_m + G_a + G_s$$

式中，R 为净辐射通量；$H=D_a(T_0-T_z)$ 为覆盖物外表面与近地空气层的显热交换，T_0 是土壤表面温度，T_z 是距地面高度 z 处的温度，D_a 为空气的水汽扩散系数；$LE=\gamma^{-1}\frac{D_f D_a}{D_f+D_a}(e_{os}-e_z)$ 为覆盖物外表面与近地空气层的潜热交换，γ 是干湿表常数，D_f 为水汽扩散系数，e_{os} 是土壤表面的水汽压，e_z 是距地面高度 z 处的水汽压；G_m 为覆盖物上下表面之间的热传导；G_a 为在空气层 δ_a 内的热交换；G_s 为地表与土壤内部的热交换。

(2) 基本热传导方程：

$$\frac{\partial^2 T}{\partial \tau^2} = k\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

式中，T 为土壤温度；τ 为时间；x 为土壤深度；k 为土壤导温系数。

(3) 下垫表面的辐射平衡方程是：

$$R = (1-\alpha)Q - A$$

式中，α 为下垫面的反射率；Q 为太阳总辐射；A 是下垫面的有效辐射。

(4) 影响覆盖地温度变化的微气象条件分析公式：

$$T_0 = T_z + \frac{Q}{\beta} - \frac{\alpha Q}{\beta} - \frac{A}{\beta} - \frac{G_s}{\beta} - \frac{\eta D_a \delta\gamma^{-1}}{\beta}$$

式中，T_z 表示当地表从太阳辐射所得的能量；Q/β 表示，如果下垫面和近地空气层是一黑体系统 $(\alpha=0)$，同时下垫面又没有其他任何热量支出时，最大可能超过上述平衡状态的温度；$\alpha Q/\beta$ 表示仅仅由于反射辐射的热量支出，下垫面所要降低的温度；G_s/β 表示由于土壤热传导使下垫面降低的温度；$\eta D_a \delta\gamma^{-1}/\beta$ 相当于 Penman 蒸发公式的空气干燥力项，它反映近地空气层容纳水汽的能力，显然它控制着下垫面的蒸发速度，从而影响到下垫面的温度。

土壤热交换量计算公式

高国栋，陆渝蓉：我国地表面与下层土壤间热交换量的计算和分布. 地理学报，1981, 36(3)

(1) 土壤中热能量的一般表示式：

$$Q_A(Z,T) = -\lambda\frac{\partial T}{\partial Z} = -\rho CK\frac{\partial T}{\partial Z}$$

式中，λ 为土壤导热率；C 为土壤比热；ρ 为土壤密度；K 为土壤导温系数；Z 为从地表面指向下方的深度；T 为土壤温度。

(2) 土壤热交换的计算公式：

$$Q_A = \frac{\omega'}{t}\left(S_1 - \frac{K}{10}S_2\right) \quad (\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1})$$

式中，t 为时间间隔；ω' 为土壤容积热容量；K 为土壤导温系数；S_1 为决定于时间间隔的土壤各深度温度分布特征函数；S_2 为该时段 10 与 20cm 深度的土壤温度变化特征函数。

计算土壤热交换量比较简明精确的方法还有图解积分法，其基本思路：若土壤中不考虑水平方向的热量交换，则地面与下层土壤间的热交换量等于土壤柱中热含量的变化，即：

$$Q_A = \omega'\int_0^{Z_H}[T(Z,t_2)-T(Z,t_1)]\,\mathrm{d}Z$$

式中，ω' 为土壤容积热容量；Z_H 为土壤温度变化所波及的深度；$T(Z,t_1)$和$T(Z,t_2)$ 分别为起始时间 t_1 和终止时间 t_2 时深度 Z 处的土壤温度。

黄土地区峁坡的坡地特征与土壤侵蚀计算模型

曹银真：黄土地区峁坡的坡地特征与土壤侵蚀。地理研究，1983，2(3)

(1) 特征坡度——喀尔生公式：

$$\tan\theta = \frac{\gamma-\gamma_W}{\gamma}\tan\phi'$$

式中，θ 为地面坡度；ϕ' 为土的内摩擦角；γ 为土的容重；γ_W 为水的容重。

(2) 土壤侵蚀——坡度函数：

$$f(s) = \frac{\sin\alpha}{\tan^{0.3}\alpha}$$

式中，α 为坡度。

(3) 最大侵蚀坡角的计算模型：

$$\tau_\theta = W\cdot\sin\theta = \sigma\cdot\sin\theta\cos\theta = \frac{\sigma}{2}\sin 2\theta$$

式中，σ 为坡度为 θ 上的正应力；τ_θ 为坡角为 θ 的斜坡上的切应力。

成土过程的湿润效应 M 模型

刘多森：关于土壤系统的数学建模。生态学杂志，1983，3

$$M = \frac{P}{V}$$

式中，P 为年降水量；$V = \dfrac{100\left(2^{0.1t_2} - 2^{0.1t_1}\right)}{t_2 - t_1}$ 为饱和水汽压的温度效应，t_2，t_1 分别为最热旬和最冷旬的平均气温。

土壤基底物质衰减模型

Arp P A：酸雨对土壤溶液的影响模型：一种简单方法。Ecological Modelling，1983，19

$$\mathrm{d}B/\mathrm{d}t = -kB + W - H$$

式中，$B(t)$ 是土壤的基底物质，H 是酸性物质的沉积速率，W 是酸雨对净基本输入率的影响，k 是速率常数。

要达到土壤稳定态下可交换的基本阳离子量(B_{SS}^0)与最稳定值$B(t)$(B_{SS}^f)之间的中点所需的一半时间$t_{1/2}$ 为：

$$t_{1/2} = 0.693B_{SS}^0/(W + \sqrt{HW})$$

酸雨降落后，酸性阳离子在任一时间从土壤中滤去的损失值(ACL)为：

$$\mathrm{ACL} = Ht - (B_{SS}^0 - B) = Ht - (H/k)(1+\sqrt{W/H})[1-\exp(-kt)]$$

上式可简化为：

$$\mathrm{ACL} = Ht - H/k - \sqrt{HW}/k \quad (kt >> 1)$$

且

$$\mathrm{ACL} = -\sqrt{HWt} \quad (kt << 1)$$

物质微粒移动时间的分布函数

Gydesen H：模拟土壤中过滤有机化学物质的随机性方法。Ecological Modelling，1984，24

$$p(t,v,\beta,d) = \frac{d}{\sqrt{2\pi\beta t^3}}\exp[-(d-vt)^2/(2\beta t)] \quad (t>0)$$

式中，t 是物质微粒从土壤柱体顶部到底部的移动时间；v 表示极小的漂移；β 表示极小的变化；d 是土壤柱体的长度。

土壤元素背景值的表达模型

孟宪玺等：东北中部地区主要农业土壤中若干金属元素的背景值。生态学报，1985，5(2)

(1) 对于呈正态分布的元素：

$$\bar{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X_i$$

$$S=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{X})^2}{n-1}}$$

式中，$\overline{X}$是土壤元素背景值的算术平均差；S为其标准差。一般取($\overline{X}\pm S$)表示其背景值范围。

(2) 对于呈对数正态分布的元素：

$$M=\ln^{-1}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\ln x_i\right)$$

$$D=\ln^{-1}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\ln^2 x_i-n\cdot\ln^2 M}{n-1}}$$

式中，M为土壤背景值的几何平均值；D为土壤背景值的几何标准差。一般取($M/D-M\cdot D$)为背景值范围。

相容度模型

杨艳生：土壤资源的模型识别评价方法．自然资源，1986，2

$$\Pi_0(A_i)=1-\left|\mu_N(A)-p_i\right|$$

式中，$\Pi_0(A_i)$为$A\in U$对p_i的相容度；p_i为参考对象的得分值；$\mu_N(A)$为A的得分值。

评价土壤侵蚀与土壤生产力关系的模式分量模型

李忠魁：国外评价土壤侵蚀与土壤生产力关系的模式．水土保持通报，1986，6(5)&7(1)

1．水文

(1) 地表径流模型：

$$Q=\frac{(R-0.2S)^2}{R+0.8S}$$

$$q_p=\frac{\alpha QA}{360t_c}$$

式中，Q为日径流量，R为日降雨量；S为持水系数；q_p为洪峰流量；α为一个无量纲的系数，表示在流域集流时间内的降雨量占总降雨量的比例；t_c为集流时间；A为集水区面积。

(2) 渗透量模型：

$$O_i=SW_{oi}\left[1-\exp\left(-\frac{\Delta t}{TT_i}\right)\right]$$

式中，O_i为穿过第i层的水流渗透率；SW_o为日初始的土壤含水量；Δt为水分的移动时间间隔；TT为下渗历时。

(3) 亚表层横向水流模型：

$$QR_i=(SW_i-FC_i)\left[1-\exp\left(-\frac{\Delta t}{TT_{Ri}}\right)\right]$$

式中，QR_i为第i个土层的横向水流速率；FC_i为第i层的田间持水量；TT_{R_i}为横向水流移动时间。

(4) 蒸散发模型：

$$E_o=1.28\,\frac{RA(1-AB)}{58.3}\,\frac{\delta}{\delta+0.68}$$

式中，E_o为潜在蒸发速率；RA为太阳日辐射量；AB为反射率；δ为平均气温条件下饱和气压曲线的斜率。

(5) 融雪模型：

$$S_{ML}=4.577T_{max}$$

$$S_{ML}<S_{NO}$$

$$S_{ML}=S_{NO}$$

式中，S_{ML}为融雪速率；T_{max}为日最高气温；S_{NO}为融雪前雪的含水量。

2．气象

风速的频率U模型：

$$U=\left(\frac{V}{V_p}\right)^{\eta-1}\exp(\eta-1)\left(1-\frac{V}{V_p}\right)$$

式中，V为风速；V_p为出现频率最高的风速；η为γ分布的形状参数。

3．土壤侵蚀

(1) 水蚀：

a．降雨——奥斯塔得-福斯特方程：

$$\begin{cases}Y=\left(0.646EI+0.45Q(q_p)^{0.333}\right)K\cdot CE\cdot PE\cdot LS & (Q>0)\\ Y=0 & (Q<0)\end{cases}$$

式中，Y为产沙量；EI为降雨能量因子；Q为径流量；q_p为最大径流速度；K为土壤可侵蚀性因子；CE为作物管理因子；PE为控制侵蚀的措施因子；LS为坡长和坡度因子。

b．灌溉——MUSLE方程模型：

$$Y=11.8(Q\cdot q_p)^{0.56}K\cdot CE\cdot PE\cdot LS$$

(2) 风蚀量模型：

$$WE=f(I,WC,WK,WL,VE)$$

$$WL = \frac{FL \cdot FW}{FL\left|\cos\left(\frac{\pi}{2}+\theta-\phi\right)\right| + FW\left|\sin\left(\frac{\pi}{2}+\theta-\phi\right)\right|}$$

$$VE = 0.2533(g_1 B_{AG} + g_2 SR + g_3 FR)^{1.363}$$

式中，WE 为风蚀量；I 为土壤可蚀性指标；WC 为气象因子；WK 为土垄的糙率因子；WL 为沿主风向的田间长度，FL 为田面长度，FW 为田面宽度，θ 为从北极方向顺时针旋转的风向角，ϕ 为田间长度方向和北极方向间的顺时针夹角；VE 为植被覆盖量，g_1、g_2 和 g_3 为某种作物的系数，B_{AG} 为正在生长的作物地上生物量，SR 为前期作物的直立残茬，FR 为匍匐残茬。

4. 养分——氮

(1) 地表径流损失的硝酸盐模型：

$$V_{NO_3} = W_{NO_3}\left[1-\exp\left(-\frac{QT}{UL}\right)\right]$$

$$C_{NO_3} = \frac{V_{NO_3}}{QT}$$

式中，W_{NO_3} 为一天开始时土层中所含的 NO_3-N 的重量；QT 为第一层丢失的总水量；UL 为该层中储水量的上限；V_{NO_3} 为从第一层损失的 NO_3-N 总量；C_{NO_3} 为第一层的 NO_3-N 的浓度。

(2) 土壤蒸发引起的 NO_3-N 的转运模型：

$$E_{NO_3} = \sum_{j=2}^{M}(E_s)_j(C_{NO_3})_j$$

式中，E_{NO_3} 为由于土壤蒸发的影响，从深层土壤移向顶层土中的 NO_3-N 总量；j 表示土层；M 为土壤蒸发的土层数。

(3) 泥沙转运有机氮的模型：

$$N_{yo} = 0.001Y \cdot CON \cdot ER$$

$$ER = X_1 C_S^{X_2}$$

式中，N_{yo} 为径流中损失的有机氮；Y 为产沙量；CON 为表土层的有机氮含量；ER 为富集率，C_S 为泥沙浓度，X_1 和 X_2 为由上、下限确定的参数。

(4) 脱氮作用模型：

$$\begin{cases} DN_j = W_{NO_{3,j}}[1-\exp(CND)\times(TF_{Nj})(C_j)] & (SWF_j > 0.9) \\ DN_j = 0 & (SWF_j < 0.9) \end{cases}$$

式中，DN_j 为第 j 层的脱氮速率；CDN 为脱氮常数；TF_N 为养分温度因子；SWF 为土壤水分因子；C 为有机氮百分含量。

(5) 矿化作用模型：

$$R_{mn} = (R_{dc})(N_{fo})$$

$$HMN = \frac{(CMN)(SWF)(TF_N)(ON)(BD)^2}{(BDP)^2}$$

式中，R_{mn} 为新鲜有机氮的氮矿化速率；R_{dc} 为新鲜有机氮的分解速率；N_{fo} 为现有的为新鲜有机氮数量；HMN 为腐殖质层的矿化速率；CMN 为稳定矿化速率系数；ON 为土层中的有机氮数量；BD 为确定的土壤容量；BDP 为受耕作扰动的土壤容量。

(6) 固定作用模型：

$$WIM = (R_{dc})(FR)(0.016 - C_{NFR})$$

式中，WIM 为氮固定速率；C_{NFR} 为作物残茬中 N 量；FR 为水平作物残茬。

(7) 作物对氮的吸收模型：

$$UND_{IDA} = (CNB)_{IDA}(B)_{IDA} - (CNB)_{IDA-1}(B)_{IDA-1}$$

式中，UND_{IDA} 为作物需氮量；IDA 为一年中的某一天；CNB 为作物最佳含氮量，是生长期的函数；B 为累积生物量。

5. 养分——磷

(1) 地表径流中损失的可溶性磷 Y_{SP} 的模型：

$$Y_{SP} = \frac{0.01(C_{LPl})(Q)}{K_d}$$

式中，C_{LPl} 为第 L 土层内不稳定磷的含量；K_d 为泥沙含磷量与磷溶液浓度的比值。

(2) 泥沙对磷的转运模型：

$$Y_P = 0.001Y \cdot C_p \cdot ER$$

式中，Y_P 为径流中沉淀所损失的磷；C_p 为表土层的含磷量。

(3) 无机磷的循环平衡方程：

$$MPR_i = 0.1SWF_i \exp(0.115T_i - 2.88) \times \left[AP_i - MP_{ai}\left(\frac{PSP_i}{1-RSP_i}\right)\right]$$

式中，MPR_i 为第 i 层的无机磷流率；T 为土壤温度；MP_a 为在活跃无机磷组中磷的数量；PSP 为磷吸收系数。

(4) 作物对磷的吸收模型：

$$UPD_{IDA}=(CPB)_{IDA}(B)_{IDA}-(CPB)_{IDA-1}(B)_{IDA-1}$$

式中，UPD_{IDA} 为作物需磷量；IDA 为一年中的某一天；CPB 为作物最佳含磷量。

6. 土壤温度

土温估算模型：

$$T(z,t)=\bar{T}+\left[\frac{A_m}{2}\cos\left(\frac{2\pi}{365}(t-200)\right)\right]+$$

$$TG-T(0,t)e^{-\frac{z}{DD}}$$

式中，z 为地表下的土层深度；t 为时间；$\bar{T}$ 为年平均气温；A_m 为日平均气温的年变化范围；DD 为土壤温度的衰减深度。

7. 耕作

混合耕作方程：

$$X_i=(1-EF)X_{oi}+\left(\frac{Z_i-Z_{i-1}}{PD}\right)EF\sum_{j=1}X_{oj}$$

式中，X_i 为经混合后第 i 土层的混合物数量；EF 为耕作结果的混合效率；X_{oj} 为混合前第 j 层的混合物量；M 为耕作深度内的土层数。

8. 经济因子

不定投资总额TVC 模型：

$$TVC=\sum_{i=1}^{M}(PR_i)(QA_i)$$

式中，PR 为第 i 项不定投资的单价；QA 为每公顷的投资数量。

9. 植物环境控制

(1) 灌水量 AIR 模型：

$$AIR=\frac{FC-W_S}{1-R_{ei}}$$

式中，FC 为根区田间持水量；W_S 为灌溉前的根区土壤含水量；R_{ei} 为径流率。

(2) 施肥模型：

$$BF=B_j+(BE)\left(PRA-\sum_{K=1}^{j}RA_K\right)0.03(BFT)$$

$$FN=C_{NB}(BF)-UN_j-\sum_{i=1}^{M}W_{NO_3 j}$$

式中，BF 为作物生长季末的预测生物量；B_j 为第 j 天的累积生物量；BE 为能量与作物生物量间的转化系数；PRA 为生长季的太阳辐射能；BFT 为模式使用者提供的植物应力参数；FN 为氮肥施用量；C_{NB} 为生长季末的植物含氮量；UN_j 为第 j 天的植物含氮量。

土壤侵蚀、运移和沉积的模拟

Vardi R MK, Rogowski A S：模拟土壤侵蚀、运移和沉积。Ecological Modelling, 1986, 33

(1) 土壤的分离 D_F：

$$D_F=(10\beta V)(\tau-\tau_{cr})$$

式中，V 是计算的溪流速度；τ 是水流的剪切压力，τ_{cr} 是土砂运移所必须的临界剪切压力；$\beta=0.01V^2/d(\rho_s-\rho_p)$，$d$ 是平均土壤颗粒直径，ρ_s 和 ρ_p 分别指土壤和流体的密度。

(2) 溪流运移能力(T_F)：

$$T_F=0.635(\rho_s-\rho_p)d(g^3hS_r)^{0.5}\times\left[\delta-\frac{1}{\alpha}\lg(1+\alpha\delta)\right]$$

式中，g，h 和 S_r 分别是重力加速度，水力半径和水道的斜率；

$$\alpha=2.45\left(\frac{\rho_p}{\rho_s}\right)^{0.4}T^{0.5}$$

$$\delta=(T-T_{cr})/T_{cr}，当 T<T_{cr} 时，\delta=0。$$

式中，T 是升力，T_{cr} 是临界升力。

以能量平衡为基础的干旱指数

唐登银：一种以能量平衡为基础的干旱指数，地理研究，1987，6(2)

(1) 土壤水分干旱指数：

$$I_{SWS}=1-\frac{E_a}{E_0}=\frac{\gamma(1+r_s/r_a)-\gamma}{\Delta+\gamma(1+r_s/r_a)}$$

式中，$\frac{r_s}{r_a}=\frac{\gamma\cdot r_aR_n/\rho C_p-(T_s-T_A)(\Delta+\gamma)-(e_s^*-e_A)}{\gamma[(T_s-T_A)-r_aR_n/\rho C_p]}$；

$r_a=\frac{\mathrm{Ln}\frac{Z}{Z_0}}{K^2u}$；$I_{SWS}$ 为土壤水分干旱指数；E_a 为实际蒸发量；E_0 为潜在蒸发量；γ 为干湿表常数；为饱和水

汽压对温度的斜率；ρ 为空气密度；C_P 为空气比热；T_s 为土面温度；T_A 为空气温度；e_s^* 为温度时的饱和水汽压；e_A 为空气水汽压；r_a 为空气动力学阻抗；r_s 为表面对水汽传递的阻抗；Z 为高度；Z_0 为粗糙长度；K 为卡玛常数；u 为风速。

(2) 土壤表面的能量平衡方程：

$$R_n - H + \lambda E + G$$

式中，R_n 为净辐射；H 为从土壤到空气的显湿流；λE 为潜热流，λ 为汽化潜热，E 为蒸发量；G 为土面以下的热流。

(3) 彭曼-蒙蒂思公式：

1) 表示实际蒸发：

$$\lambda Ea = \frac{\Delta R_n + \rho C_p \left(e_A^* - e\right) / r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_s / r_a)}$$

2) 表示潜在蒸发：

$$\lambda Ea = \frac{\Delta R_n + \rho C_p \left(e_A^* - e_A\right) / r_a}{\Delta + \gamma}$$

土壤汞环境容量模型(重金属物质平衡模型)

熊先哲等：草甸棕壤汞环境容量研究．生态学报，1988，8(1)

$$S_{t+1} = S_t + \sum_{i=1}^{m} I_i - \sum_{j=1}^{n} O_j$$

式中，S 为土壤汞浓度；t 为时间；I 为输入项；O 为输出项；i、j 分别为输入项和输出项的项数。

蒸发量与土壤湿度和地下通量关系分析公式

陈科信：蒸发量与土壤湿度和地下通量关系的模式．地理学报，1988，43(2)

(1) 土壤剖面上水分随时间变化的一维模式：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -K \frac{\partial^2 S}{\partial Z^2} - \frac{\partial K}{\partial Z} \cdot \frac{\partial S}{\partial Z} + \frac{\partial K}{\partial Z}$$

式中，θ 为容积含水量；t 为时间；K 为毛管导水率；S 为土壤吸力；Z 为地下水埋深。

(2) 地下水垂直通量计算模式：

$$Z = \int \frac{K}{K + Q} \mathrm{d} S$$

式中，Z 为地下水埋深；S 为土壤吸力（或土壤含水量）；Q 为地下水通量。

(3) 土壤毛管导水率：

$$K = \frac{a}{b - S^n}$$

式中，S 为土壤吸力；a、b 和 n 为待定常数。

(4) 土壤水分蒸发量：

$$E = E_0 \left[1 - B^{\frac{1}{n}} \left(\frac{S}{S_P} \right)^{\frac{m}{n}} \left(1 - \frac{Q}{E_0} \right) \right]$$

式中，E 为实际蒸发量；E_0 为在一定气象条件下、蒸发层足够湿润时的最大可能蒸发量(即蒸发力)；S 为蒸发层内实际土壤水分吸力；S_P 为毛管破裂含水量之吸力；$B = \frac{S_P}{m}$；Q 为地下水垂直向上通量；m 和 n 为大于 1 的参数。

确定林地枯落物最佳蓄积量的数学模型

苏宁虎：林地枯落物最佳蓄积量确定方法的探讨．生态学报，1988，8(2)

(1) 侵蚀速率指数 I_{er} 模型：

$$I_{er} = S / S_0$$

式中，S 为有枯落物覆盖的林地土壤侵蚀速率；S_0 为无覆盖的土壤侵蚀速率。

(2) 蒸发抑制率 R 模型：

$$R = (E_0 - E) / E_0$$

式中，E_0，E 分别为无枯落物及有枯落物覆盖时的土壤蒸发量。

(3) 温度影响指数 T_c 模型：

$$T_c = T_i / T_0$$

式中，T_i 为枯落物层下矿质土壤表面温度；T_0 为同条件下无覆盖的土壤表面温度。

(4) 最佳蓄积量 L_{op} 模型：

$$L_{op} = d_{max} = \left(\prod_{i=1}^{3} d_i \right)^{1/3}$$

式中，$d_1 = \mathrm{ERI}$；$d_2 = R$；$d_3 = T_c$。

土壤侵蚀量的推算模型

张信宝，李少龙等：^{137}Cs 法测算梁峁坡农耕地土壤侵蚀量的初探．水土保持通报，1988，8(5)

$$Y = 4.04 X^{0.53}$$

式中，Y 为 $^{137}C_S$ 流失量；X 为年土壤流失量。

土壤的磷吸附率及其连续变化的计算公式

Chapman S B, Rose R J, basanta M：英国南部致石南丛生的荒野的土壤的磷吸附率及其连续变化. Journal of Applied Ecology, 1989, 26

（1）同位素可转换磷(P_{ie})：

$$P_{ie} = P/R$$

式中，P 是土壤溶液中残留的磷；R 是土壤溶液中残留的 $^{32}PO_4$ 部分。

（2）磷的吸附：

$$x = kx_m c/(1 + kc)$$

式中，x 是被吸附的磷的数量；x_m 是最大吸附量；k 是吸附/解吸附作用平衡常数；c 是平衡溶液的浓度。

$$x_m = [(a + b)(1 - (m/n))]$$

式中，a 是初始 IEP；b 是加到初始溶液中的磷；m 是溶液中最终的 ^{32}P 的放射性；n 是溶液中初始的 ^{32}P 的放射性。

变动河床数学模型

励强，陆中臣，徐小慧：黄河下游泥沙输移数值模拟。地理研究，1989，8(1)

$$\begin{cases} \dfrac{\partial}{\partial x}Q + B\dfrac{\partial}{\partial x}H = 0 \\ \dfrac{\partial}{\partial t}Q + \dfrac{\partial}{\partial x}\left(\dfrac{Q^2}{A}\right) + gA\dfrac{\partial}{\partial x}H = gA(J - J_f) \\ \dfrac{\partial}{\partial x}(AS) + \dfrac{\partial}{\partial x}(QS) = -\alpha' B\omega J(S - S_*) \\ \dfrac{\partial}{\partial x}(QS) + r_s' B\dfrac{\partial}{\partial t}Z = 0 \\ x \in [0, L] \qquad t \in [0, \infty] \end{cases}$$

式中，Q 为流量；H 为水深；S 为含沙量；B 为断面高度；A 为断面面积；r_s' 为泥沙容重；J 为河床比降；S_* 为挟沙能力；ω 为泥沙沉速；g 为重力加速度；Z 为冲淤厚度；J_f 为摩阻比降；$\alpha' = 10\alpha$，α 为恢复饱和系数。

铬在土壤中的平衡与累积预测公式

夏增禄：北京地区铬的土壤化学地理. 地理学报，1989, 44(4)

（1）土壤中铬的残留累积预测：

$$C_s^t = C_{s0}K^t + K\frac{1 - K^t}{1 - K} - Z\frac{K - K^t}{1 - K}$$

式中，C_s^t 为 t 年后累积量；C_{s0} 为土壤起始含量；Z 为径流、作物带走、渗漏等的综合输出常数；K 为径流、作物带走、渗漏等的综合输出系数。

（2）土壤铬的评价分区：

$$K_i = C_i / W_i$$

式中，K_i 为等标评价系数；C_i 为 i 元素含量；W_i 为 i 元素的评价标准。

水库滑坡的稳定系数

中村浩之：论水库滑坡. 水土保持通报，1990, 10(1)

$$F_S = \frac{\sum[CL + (N - U)\tan\Phi]}{\sum T}$$

式中，N 为作用在每一条块滑动面上的载荷的法向分量；T 为作用在每一条块滑动面上的载荷的切向分量；U 为作用在每一条块滑动面上的孔隙水压力；Φ 为每一条块滑动面物质的内摩擦角；C 为每一条块滑动面物质的黏聚力；L 为每一条块滑动面的长度。

土壤热惯量模式

张仁华：改进的热惯量模式及遥感土壤水分. 地理研究，1990, 9(2)

（1）热通量计算公式：

$$G = \sum_{k=1}\left|\frac{T_k}{Z_{ik}}\right|$$

式中，G 为热通量；T_k 为温度的第 k 谐波分量；$Z_{ik} = Z_k \cdot \dfrac{Z_d + Z_k \tanh\gamma_k d}{Z_k + Z_d \tanh\gamma_k d}$ 为第 k 谐波的输入土壤阻抗，Z_d 为在 d 深度的土壤阻力，Z_k 为土壤特征阻力，γ_k 为传播常数。

（2）热惯量计算公式：

$$P = \frac{\sum_{i=t_1}^{t_2}(R_{ni} - H_i - LE_i)\Delta_i}{\sqrt{(t_2 - t_1)}(T_2 - T_1)} = \frac{V_S P_S + V_W P_W + V_A P_A}{V_S + V_W + V_A}$$

式中，P 为土壤热惯量；Δ_i 为地表热量平衡个分量变化过程中第 i 时刻的下标；R_n 为地表净辐射通量；H 为地表乱流通量；LE 为地表潜热通量；G 是土壤热通量；V_S、V_W 和 V_A 分别为土壤、水、空气的体积；

P_S、P_W、P_A 分别为土壤、水、空气的热惯量；$R_{nj}=s(1-\rho_j)-\sigma(\varepsilon T_j^4-T_{sky}^4)$，$T_{sky}$ 为天空温度，σ、s 分别为某种土壤的凋萎系数及田间持水量。

在一幅影像图中第 j 点热惯量值的计算公式：

$$P_j=\frac{\sum_{i=1}^{t_2}R\left(1-\zeta_{ij}\Theta_i-\frac{W_\theta-b}{W_f-W_\theta}\cdot\eta_i\right)\Delta_i}{\sqrt{t_2-t_1}(T_2-T_1)+\sum_{i=t_1}^{t_2}\frac{aLE_{0i}}{W_f-W_\theta}\Delta_i}$$

式中，P_j 为第 j 点的热惯量值。

(3) 温度计算公式：

$$T_0=\frac{R_n r_a v}{\rho C_p(v+\Delta)}-\frac{G r_a v}{\rho C_p(v+\Delta)}-\frac{d}{v+\Delta}-T_a$$

式中，T_0 为表面温度；r_a 为空气阻力；d 为空气饱和差；T_a 为空气温度；v 为干湿表常数；Δ 为对温度对饱和水汽压的斜率；ρ 为空气密度；C_p 为定压比热。

(4) 空气密度计算公式：

$$\rho=\frac{KS_{max}(1-\bar{\alpha})-\varphi_1(T_{max}^4+T_{min}^4)-\varphi_2(T_{max}+T_{min})-\varphi_3}{\sqrt{\Delta\tau}(T_{max}-T_{min})}$$

式中，$\bar{\alpha}$ 为地表平均反射率；T_{max}、T_{min} 为地表日最高最低温度；φ_1，φ_2，φ_3 分别为辐射散热项系数、显热散热项系数和潜热散热项系数；k 为与 $\Delta\tau$ 相协调的累加系数。

(5) 空气阻力计算公式：

$$r_a=\left(\ln\frac{z}{z_0}\right)^2\left[1-n\cdot z\cdot(T_0-T_a)/\bar{T}u^2\right]/0.16u$$

式中，z_0 为粗糙度；T_0 为地表温度；z 为观测 T_a 及 u 的高度；T_a 为空气温度；u 为风速；n 为经验常数。

(6) 显热通量比计算公式：

$$\zeta=\frac{(T-T_a)\left(1-c\frac{T_\theta-T_a}{T_\theta+T_a}\right)}{(T_\theta-T_a)\left(1-c\frac{T-T_a}{T+T_a}\right)}$$

式中，$c=\frac{2nZ}{u^2}$。

土壤水分运动及土壤水通量的计算公式

李宝庆，刘昌明，杨克定：零通量面方法的应用研究．地理研究，1990，9(2)

(1) 包气带土壤水分运动的基本微分方程：

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{sx}\frac{\partial\psi}{\partial t}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{sy}\frac{\partial\psi}{\partial t}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{sz}\frac{\partial\psi}{\partial t}\right)$$

式中，K_s 为导水率；ψ 为土壤水势。

(2) 土壤水通量的计算公式：

$$q(z_1)-q(z_2)=\int_{Z_1}^{Z_2}\frac{\partial\theta}{\partial t}\mathrm{d}z$$

$$w(z_1)-w(z_2)=\int_{Z_1}^{Z_2}\theta(z,t_2)\mathrm{d}z-\int_{Z_1}^{Z_2}\theta(z,t_1)\mathrm{d}z$$

式中，$q(z_1)$，$q(z_2)$ 为通过断面 z_1，z_2 的土壤水分通量；$w(z_1)$，$w(z_2)$ 分别为在 $t_1\sim t_2$ 时段内通过 z_1，z_2 处单位土壤断面面积上的总水量；$\theta(z,t_1)$，$\theta(z,t_2)$ 分别为起始时刻 t_1 和终了时刻 t_2 时，两断面间垂直剖面上的土壤含水率曲线。

二维土壤蒸发过程的数值分析模型

杨邦杰，陈镜明：二维土壤蒸发过程的数值分析．生态学报，1990，10(4)

1. 沟垄上的空气动力学阻力

(1) 风向垂直沟垄走向时，(x,z) 处的空气动力学阻力模型：

$$r_a(x,z)=u_z/u_*^2(x,z)$$

式中，u_z 为参考高度 z 处的风速；$u_*(x,z)=\frac{ku_5(x,z)}{\ln(0.05/Z_0)}$，为 (x,z) 处的摩擦风速，k 为 Von Karman 常数，$u_5(x,z)=[a+b(d\cdot H/W)^c\cos(\pi x/W)]\cdot u_z$，为沟垄上 (x,z) 处上面 0.05m 处的风速，Z_0 为地表粗糙度系数；$z=h+h\cdot\cos(\pi x/W)$，为沟垄的边界形状，W 为沟宽，$h=H/2$，H 为垄高。

(2) 风向与沟垄走向平行时，(x,z) 处的空气动力学阻力模型：

$$r_a(x,z)=[\ln(Z_c(x,z)/Z)]^2/(k^2u_z)$$

式中，$Z_c=Z-h\cdot\cos(\pi x/W)$，为修正的参考高度。

(3) 风向与沟垄走向成一角度 γ 时，修正的垄宽和 x 坐标模型：

$$W_t = W/\sin\gamma$$
$$X_t = x/\sin\gamma$$

2. t 时刻沟垄上(x, z)处的蒸发率模型

$$E_s(x,z,t) = \frac{H_s(x,z,t) - H_a(t)}{r_c(x,z,t) + r_s(x,z,t)}$$

式中，$H_s(x,z,t) = H_0 \cdot \exp[\psi g / R(T_s + 273.16)]$，为(x, z)处地表空气的绝对湿度，H_0 为空气在温度 T_s 下的饱和湿度，ψ 为地表土壤的水势，R 为通用气体常数，g 为重力加速度；H_a 为参考高度 z 处的空气绝对湿度；r_s 为土壤表面蒸发阻力；$r_c(x,z,t) = r_a(x,z,t) \cdot S_t$，$S_t$ 为稳定度修正系数。

3. 沟垄上总辐射模型

$$R_g(x,z,t) = S_{\alpha\beta} + R_d$$

式中，R_d 为散射辐射；$S_{\alpha\beta} = S_m[\sin(h_0)\cos\alpha + \cos(h_0)\sin\alpha\cos(A-\beta)]$，为直接辐射，$\alpha,\beta$ 分别为坡度角和坡的方位角，h_0 为该时刻的太阳高度角，A 为太阳的方位角。

4. 土壤中水分与温度分布的有限元分析——控制方程

$$C_w \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \cdot (K_w \nabla \psi) + \nabla \cdot (D_{Tv} \nabla T) - \frac{\partial K}{\partial z}$$
$$C_h \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \rho_l L \nabla \cdot (K_v \nabla \psi)$$

式中，ψ(m) 为土壤水的基质势；T 为土壤温度；t 为时间；$C_w(m^{-1})$ 为比水容量；$C_h(J \cdot m^{-3} \cdot {}^\circ C^{-1})$ 为土壤热容量；$K(m \cdot s^{-1})$ 为导水率；$D_{Tv}(m^2 \cdot s^{-1} \cdot {}^\circ C^{-1})$ 为与温度梯度有关的水汽扩散率；$\lambda(J \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot {}^\circ C^{-1})$ 为导热率；ρ_l 为液态水密度；L 为水的汽化潜热；$K_v(m \cdot s^{-1})$ 为水汽在基质势梯度下的当量导水率。

土壤侵蚀量计算模型

汪阳春、张信宝等：黄土峁坡侵蚀的 ^{137}Cs 法研究．水土保持通报，1991，11(3)

(1) 侵蚀无分选的非农耕地 1963 年以来的侵蚀量模型：

$$A_h = A \cdot (1 - e^{-\lambda h})$$

式中，A_h 为土壤剖面中某一深度以上的 ^{137}Cs 总量；A 为 ^{137}Cs 的背景值；λ 为 ^{137}Cs 下渗系数；h 为深度。

(2) 侵蚀无分选的农耕地的侵蚀量模型：

$$X_N = Y_N \cdot \left(1 - \frac{\Delta H}{H}\right)^{N-1963}$$

式中，X_N 为侵蚀土壤剖面的 ^{137}Cs 总量；Y_N 为 ^{137}Cs 背景值；ΔH 为耕作土年平均流失厚度；H 为犁耕层深度；N 为抽样年份。

土壤侵蚀的基本规律模型

张建国，李友仁，赵惠君：山西省海河流域土壤侵蚀的基本规律．水土保持通报，1991，11(5)

(1) 侵蚀模数 M 模型：

$$M = \frac{W}{F}$$

式中，W 为河流年输沙量；F 为河流的流域面积

(2) 岩石裸露系数 R 模型：

$$R = \frac{W_y}{W} \times 100\%$$

式中，W_y 为研究区岩石裸露面积；W 为其总面积。

通用土壤流失方程

陈法扬，王志明：通用土壤流失方程在小良水土保持试验站的应用．水土保持通报，1992，12(1)

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

式中，A 为土壤流失量；R 为降雨侵蚀因子；K 为土壤可侵蚀性因子；L 为坡长因子；S 为坡度因子；C 为耕作和经营管理因子；P 为土壤保持因子。

崩塌(滑塌)和滑坡模型

张淑光，黎庆，邓岚：我国南方崩岗形成机理的研究．水土保持通报，1993，13(2)

(1) 临界深度 Z_0 模型：

$$Z_0 = \frac{2C}{r}\tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}J\right)$$

式中，C 为土的内聚力；J 为谷坡张裂隙；φ 为土的内摩擦角；r 为土的容重。

(2) 临界下切深度 H_c 模型：

$$H_c = 2Z_0$$

(3) 抗剪强度 S 模型：

$$S = C + Q\tan\varphi$$

式中，Q 为法向应力；其他同上。

固定过滤反应中土壤放射性核物质迁移模型

Kasimovsky A A: 固定过滤反应中土壤放射性核物质迁移模型的解析解法 Ecological Modelling. 1993, 66

土壤放射性核物质垂直迁移的方程模型系统中，假定 $t>0$ 是事故发生后的时间；x 是从地表到土层深度的空间坐标；土壤中的放射性核物质被分成三部分：主要的流失部分，可移动的部分和固定不动的部分，它们分别是 $C_1(x,t)$、$C_2(x,t)$，和 $C_3(x,t)$：

$$\frac{\partial C_1}{\partial t}=-QK\exp(-Kt)\delta(x)$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial t}=D\frac{\partial^2 C_2}{\partial x^2}-V\frac{\partial C_2}{\partial x}-\frac{\partial C_1}{\partial t}-\frac{\partial C_3}{\partial t}$$

$$\frac{\partial C_3}{\partial t}=\gamma C_2-\beta C_3$$

式中，D 和 V 是有效扩散系数和可移动部分的运移速度；γ 和 β 是核素被土壤和过滤返回过程固定时的速率常数；K 是流失分解率常数；Q 是某种放射性核物质的污染密度；$\delta(x)$ 是 Dyrac 函数。

土壤孔隙度模型

喻光明：江汉平原渍害田生态特征的研究，生态学报，1993，13(3)

$$\text{土壤孔隙度}(\%)=\left[1-\frac{\text{土壤容重}\ (\mathrm{g\cdot cm^{-3}})}{\text{土壤比重}\ (\mathrm{g\cdot cm^{-3}})}\right]\times 100$$

SOINFIL 模型

高琼，张为政：SOINFIL——一种从渗水实验中获取土壤持水和导水特性参数的方法 生态学报，1993，13(3)

(1) 一维土壤水运动方程：

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial Z}\left[K(\theta,P_k)\left(\frac{\partial h}{\partial Z}-1\right)\right]$$

式中，h、K 分别为土壤的基质势和导水率；θ 为土壤的体积含水量；P_k 为模型的参数向量；Z 的指向为垂直向下，地表 $Z=0$。

(2) 优化的目标函数：

$$\min\int_0^{T_m}\left[I(t)-\hat{I}(t)\right]^2\mathrm{d}t=$$

$$\min\int_0^{T_m}\left[I(t)-\int_0^{\infty}(\theta(Z,t)-\theta_i(Z,t))\,\mathrm{d}Z\right]^2\mathrm{d}t$$

式中，$\hat{I}(t)=\int_0^{\infty}[\theta(Z,t)-\theta_i(Z,t)]\mathrm{d}Z$ 为入渗量的模拟值，$\theta_i(Z)$ 为土壤初始含水量。

(3) 土壤的持水特性(h)和导水特性(K)模型：

$$h=h_0\left[\left(\frac{\theta_s}{\theta}\right)^b-1\right]$$

$$K=K_0\left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^d$$

式中，$[h_0,b]=P_h$、$[K_0,d]=P_k$ 均为参数向量。

土壤流失量模型

吴素业：安徽大别山区坡耕地土壤流失量回归方程的研究. 水土保持通报，1993，13(4)

$$M=dR^{b_1}\theta^{b_2}C^{b_3}$$

式中，R 为降雨侵蚀力；θ 为地面坡度；C 为植被覆盖率；b 为回归系数。

土壤环境容量模型

夏增禄：中国主要类型土壤若干重金属临界含量和环境容量的区域分异. 地理学报，1993，48(4)

$$Q=\frac{\left(Q_T-Q_0K^T\right)(1-K)-2Z\left(1-K^T\right)}{K\left(1-K^T\right)}$$

式中，$Q\,(\mathrm{g\cdot ha^{-1}\cdot a^{-1}})$为土壤环境容量；$Q_T$ 为 1ha 耕层土壤临界含量时某元素的量；Q_0 为 1ha 耕层土层自然背景含量时某元素的量；K 为系数；Z 为常数。

水稻土肥力限制下的生产潜力模型

杨京平，章熙谷：江苏省丹阳市两种种植制度气候、土壤生产潜力的初步研究. 自然资源，1993，5

(1) 耕作层的隶属函数 $\mu_T(x)$ 模型：

$$\mu_T(x)=\begin{cases}1 & (x\geqslant 20\mathrm{cm})\\ \dfrac{x}{20} & (0<x<20\mathrm{cm})\end{cases}$$

(2) 土壤容重的隶属函数 $\mu_D(x)$ 模型：

$$\mu_D(x)=\begin{cases}1 & (1.2\leqslant x\leqslant 1.25)\\ \dfrac{36-20x}{11} & (1.25<x<1.8)\\ 2.5x-2 & (0.8<x<1.2)\end{cases}$$

(3) 土壤保肥性隶属 $\mu_o(x)$ 函数：

$$\mu_O(x)=\begin{cases}1 & (50\% \leqslant x \leqslant 70\%)\\ \dfrac{x-20}{30} & (20\% < x < 50\%)\\ 0 & (x \leqslant 20\%)\end{cases}$$

(4) 土壤 pH 的隶属函数 $\mu_E(x)$ 模型：

$$\mu_E(x)=\begin{cases}2-\dfrac{pH}{7} & (pH>7)\\ \dfrac{pH}{7} & (pH \leqslant 7)\end{cases}$$

(5) 土壤养分(N.P.K)的隶属函数 $\mu_N(x)$ 模型：

$$\mu_N(x)=\begin{cases}\dfrac{1}{3}\left(\dfrac{TN}{0.2}+\dfrac{TP}{0.2}+\dfrac{TK}{3.0}\right) & (TN<0.2, TP<0.2, TK<3.0)\\ 1 & (TN \geqslant 0.2, TP \geqslant 0.2, TK \geqslant 3.0)\end{cases}$$

(6) 土壤有机质的隶属函数 $\mu_F(x)$ 模型：

$$\mu_F(x)=\begin{cases}1 & (x \geqslant 2.5\%)\\ \dfrac{x-0.5}{2} & (0.5\% < x < 2.5\%)\\ 0 & (x \leqslant 0.5\%)\end{cases}$$

(7) 土壤肥力指数 SI 模型：

$$SI = A \cdot R$$

式中，A 为各肥力因子的权向量；R 为各种土壤肥力因子的隶属度向量阵。

土壤一维垂直连续入渗模型

樊贵盛，党志良：间歇入渗减渗机制浅析．水土保持通报，1993，13(6)

$$q=-K\frac{\partial \varphi}{\partial z}$$

$$\varphi=\varphi_m+\varphi_g$$

式中，q 为土壤水分通量；K 为水力传导度；$\frac{\partial \varphi}{\partial z}$ 为土壤水势梯度；φ 为土壤水势；φ_m 为土壤水基质势；φ_g 为土壤水重力势。

悬移质含沙量垂线分布公式

李九发，时伟荣，沈焕庭：长江河口最大浑浊带的泥沙特性和输移规律．地理研究，1994，13(1)

$$\frac{S_V}{S_{Va}}=\left(\frac{h-y}{y}\cdot\frac{a}{h-a}\right)^z$$

$$z=\frac{\omega}{ku_*}$$

$$u_*=\frac{\sqrt{g}}{C_s}u$$

式中，ω 为沉速。

侵蚀强度计算公式

Beinhauer, Kruse B：温和气候中的土壤风蚀．Ecological Modelling, 1994, 75/76

$$Q_E=A'\cdot u_*^{(3-k)}\left[1-\left(\frac{u_{*T}}{u_*}\right)^l\right]^m$$

式中，$k=m\cdot l\leqslant 3$，并且 $A'\approx A=C\cdot\left(\frac{d}{D}\right)^n\cdot\frac{\rho_a}{g}$，$1/2\leqslant n\leqslant 3/4$；$Q_E$ 是土砂运移速率($kg\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$)；$u_*$ 是摩擦速度($m\cdot s^{-1}$)；u_{*T} 是摩擦速度的临界值($m\cdot s^{-1}$)；C 是经验权重因子($s^2\cdot m^{-3}$)，d 是平均粒径(m)，$D=0.25\cdot 10^{-3}$(m)，ρ_a 是大气密度，g 是重力常数。

农耕地土壤侵蚀量模型

吴永红，李倬，张信宝等：黄土高原沟壑区谷坡农地侵蚀及产沙的 ^{137}Cs 法研究．水土保持通报，1994，14(2)

$$X_N=Y_N\cdot\left(1-\frac{\Delta H}{H}\right)^{N-1963}$$

式中，X_N 为侵蚀土壤剖面的 ^{137}Cs 总量；Y_N 为当地 ^{137}Cs 背景值；ΔH 为耕作土壤年平均流失厚度；H 为犁耕层深度；N 为取样年份。

草地土壤水盐运动规律模型

张为政，高琼：松嫩平原羊草草地土壤水盐运动规律的研究．植物生态学与地植物学学报，1994，18(2)

(1) 土壤总孔隙度 P_t 模型：

$$P_t=\left(1-\frac{r_S}{d_S}\right)\times 100$$

式中，r_S 为土壤容重；d_S 为土壤比重。

(2) 土壤水的饱和流模型：

$$q=-k\frac{dH}{dl}$$

式中，q 为水通量；H 为水势；l 为水流距离；k 为

饱和导水率，是常数。

(3) 土壤水的非饱和流和非饱和导水率模型：

$$q=-K(\psi)\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}l}$$

$$K_i(\psi)=K_S\left(\frac{\theta_i}{\theta_S}\right)^p\frac{\sum_{j=i}^{m}(2j+1-2i)S_j^{-2}}{\sum_{j=i}^{m}(2j-1)S_j^{-2}}$$

式中，$K(\psi)$ 为非饱和导水率，是土壤水吸力的函数；K_S 为饱和导水率；θ_S 为饱和含水量；θ_i 为 S_i 相应的含水量；S 为土壤水吸力。

土壤修正系数公式

张军连，林培：土地生产潜力评价中土壤修正系数模型的研究——以河北省涿鹿县为例．自然资源学报，1994，9(3)

$$\mathrm{SMC}_i=\sum_{j=1}^{n}W_{ij}U_{ij}$$

式中，SMC_i 为第 i 评价单元的土壤修正系数；U_{ij} 为第 i 评价单元第 j 个因子的隶属度；n 为因子个数；W_{ij} 为第 i 评价单元第 j 个因子的相对权重，当 $0.2<U_{im}=\min(U_{ij})<1.0$ 时：$W_{ik}=\frac{(1-U_{ik})^2}{\sum_{j=1}^{n}(1-U_{ij})^2}$，当 $U_{im}\leqslant 0.2$ 时：$W_{im}=1-U_{im}$，$W_{ik}=\frac{(1-U_{ik})^2}{\sum_{j=1}^{n}(1-U_{ij})^2}\cdot U_{im}\ (j\neq m)$。$W_{ik}$ 或 W_{im} 为第 i 评价单元中第 k 或第 m 个因子的相对权重，U_{ik} 或 U_{im} 为第 i 评价单元中第 k 或第 m 个因子的隶属度，U_{ij} 为第 i 评价单元中第 j 个因子的隶属度。

土壤质量的综合指数 N 模型

吴先余，马俊杰，薛科社：黄土丘陵沟壑区土壤资源利用及其保护的研究——以耀县树林村林场土壤资源评价为例．水土保持通报，1994，14(5)

$$N=\frac{1}{2}\left[\frac{\sum_{i=1}^{m}ni}{\sum_{i=1}^{m}(ni)\max}\times 100+\left[\prod_{i=1}^{m}ni\right]^{2\Big/\prod_{i=1}^{m}(ni)\max}\right]$$

式中，ni 为因子评分值。

抗剪强度模型

丘世钧：红土坡地崩岗侵蚀过程与机理．水土保持通报，1994，14(6)

$$\tau=C+(P-P_w)\tan\theta$$

式中，C 为黏性土的内聚力；P 为土体的法向压力；P_w 为孔隙水压；θ 为内摩擦角。

隔坡沟状梯田土壤水分变化规律模型

张金柱，于宗周，李保国等：隔坡沟状梯田土壤水分变化规律探讨．水土保持通报，1995，15(2)

(1) 土壤水分动态的谐波分析模型：

$$A_k=\sqrt{a_k^2+b_k^2}$$

$$\varphi_{k\cdot 0}=\arctan\left|\frac{a_k}{b_k}\right|$$

$$a_0=2\bar{x}$$

$$a_k=\frac{2}{N}\sum_{t=1}^{N}x(t)\cos\frac{2\pi kt}{N}$$

$$b_k=\frac{2}{N}\sum_{t=1}^{N}x(t)\sin\frac{2\pi kt}{N}$$

式中，A_k 为各周期振动的波幅；$\varphi_{k\cdot 0}$ 为各周期振动的相位初值；N 为序列长度；k 为展开区间谐波分量的波数；$\frac{N}{k}$ 为 k 波的周期；$x(t)$ 为 t 时刻序列观测值。

(2) 土壤含水量模型：

$$\theta(t)=\theta_0-\sum_{k=1}^{3}A_k\sin\left(\frac{2\pi kt}{N}+\varphi_{k\cdot 0}\right)$$

式中，$\theta(t)$ 为 t 时刻含水量；N 为序列长度。

土壤截留及其适宜度统计模型

Morgenstern M，Kloss R：模拟"高度肥沃土地"中的土壤水分平衡．Ecological Modelling，1995，81

(1) 土壤截留模型：

$$E_i=-0.42+0.245\cdot P+0.2\cdot I_{la}-0.0111\cdot P^2-0.0271\cdot P\cdot I_{la}-0.0109\mathrm{LAI}^2$$

式中，E_i 是土壤对水分的截留；P 是降水量($\mathrm{mm\cdot d^{-1}}$)；I_{la} 是叶面积指数($\mathrm{m^2\cdot m^{-2}}$)。

(2) 相对几何平均误差(E_{rgm})是用来描述适宜程度的统计量：

$$E_{rgm} = \sqrt[m]{\frac{c_1}{o_1} \cdot \frac{c_2}{o_2} \cdot \cdots \cdot \frac{c_m}{o_m}}$$

式中，c_i 是计算值；o_i 是观测值；m 是数据成对的数量。

土壤水和土壤水分蒸发蒸腾损失总量的BOWET模型

Mirschel W, Wenkel KO, Koitzsch R：利用 BOWET 模型和来自德国北部两个研究区集水盆地 Krummbach 和 Eisenbach 的数据集模拟土壤水和土壤水分蒸发蒸腾损失总量 Ecological Modelling, 1995, 81

(1) 土壤水平衡：

$$W_{t,1} = W_{t-1,1} + P_t - E_{t,1} - G_{t,1}$$

$$W_{t,k} = W_{t-1,k} + G_{t,k-1} - E_{t,k} - G_{t,k} \qquad k = 2, \cdots, 20$$

式中，t 是儒略日；k 是层数；$W_{t,k}$ 是土壤水含量($\mathrm{mm \cdot d^{-1}}$)；P_t 是降水量($\mathrm{mm \cdot d^{-1}}$)；$E_{t,k}$ 是第 k 层对土壤水分蒸发蒸腾损失总量的贡献率($\mathrm{mm \cdot d^{-1}}$)；$G_{t,k}$ 是来自第 k 层的重力渗透。

(2) 潜在土壤水分蒸发蒸腾损失总量：

$T \leqslant 0.5$℃：

$$T_{pe} = PE = VA_{Ivanow}$$

$T > 0.5$℃，有遮挡的情况下：

$$T_{pe} = VA_{Turc} F(t)$$

$T > 0.5$℃，无遮挡的情况下：

$$PE = VA_{Turc}$$

式中，T_{pe} 被定义为来自无任何水压的有植被覆盖的土壤表层的土壤水分蒸发蒸腾损失总量；PE 是来自无植被覆盖的总保持潮湿的土壤表层的土壤水分蒸发蒸腾损失总量；T 是大气温度的每天平均值；VA 是大气层的每天土壤水分蒸发蒸腾损失总量的需求量($\mathrm{mm \cdot d^{-1}}$)，$VA_{Ivanow} = 0.0036(T+25)^2(1-RF)$，$VA_{Turc} = 0.31(G+2.09)\frac{T}{T+15}$，$RF$ 是相对大气湿度的每天平均值

(3) 农作物的截留：

截留能力 C_t (mm)：

$$C_t = 2.5 \times 10^{-3} H \cdot BG$$

式中，H 是农作物高度(mm)；BG 是被绿色农作物覆盖的土壤表面部分($0 \leqslant BG \leqslant 1$)。

在主要生长期中，截留水分的每天潜在蒸发量(T_{pe}，$\mathrm{mm \cdot d^{-1}}$)：

$$T_{pe} = 1.3 T_{pe}$$

(4) 实际土壤水分蒸发蒸腾损失总量：

$$T_{ae} = T_{pe} \cdot BG \sum_{k=1}^{n} g_k + PE(1-BG) \sum_{k=1}^{m} h_k$$

式中，g_k 和 h_k 分别是在有遮挡、无遮挡情况下，来自第 k 层的蒸腾和蒸发部分；n 和 m 分别是农作物吸取水分和在无遮挡的土壤表面的蒸发作用汲取水分的土层序号。

土壤崩解速率及其与土壤抗冲性的关系模型

蒋定生，李新华，范兴科等：黄土高原土壤崩解速率变化规律及影响因素研究．水土保持通报，1995，15(3)

(1) 土壤崩解速率模型：

$$v = a\frac{l_0 - l_t}{t}$$

式中，v 为单位时间内所崩解的试样体积；l_0 为试样浸入水中时浮筒的起始读数或稳定时的最大读数；l_t 为土样完全崩解时或第 30 min 时的浮筒读数；t 为土样完全崩解时的时间或土样未完全崩解完的第 30min 时间；a 为体积换算系数。

(2) 土壤崩解速率与土壤抗冲性的关系模型：

$$v = A\frac{1}{C^{\alpha}}$$

式中，C 为土壤抗冲刷性系数；A，α 为参数。

土壤水分的光学测量模型

马孝义，熊运章，孙明勤：土壤水分光学测量方法的田间应用潜力分析．水土保持通报，1995，15(3)

1. 理论基础

(1) 反射波和透射波模型：

$$T_{11} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_1}\cos\theta_i}{\sqrt{\varepsilon_2}\cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon_1}\cos\theta_i} A_{11}$$

$$T_L = \frac{2\sqrt{\varepsilon_1}\cos\theta_i}{\sqrt{\varepsilon_2}\cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon_1}\cos\theta_i} A_L$$

$$R_{11} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1}\cos\theta_i - \sqrt{\varepsilon_2}\cos\theta_i}{\sqrt{\varepsilon_2}\cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon_1}\cos\theta_i} A_{11}$$

$$R_L - \frac{\sqrt{\varepsilon_1}\cos\theta_i - \sqrt{\varepsilon_2}\cos\theta_i}{\sqrt{\varepsilon_2}\cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon_1}\cos\theta_i} A_L$$

式中，$A_{\perp}$、$A_{\parallel}$ 分别为入射波的垂直和平行分量；$T_{\perp}$、$T_{\parallel}$ 分别为透射波的垂直和平行分量；$R_{\perp}$、$R_{\parallel}$ 分别为反射波的垂直和平行分量。

(2) 垂直入射时的反射率 R 模型：

$$R=\left(\frac{\sqrt{\varepsilon}-1}{\sqrt{\varepsilon}+1}\right)^2$$

(3) 垂直入射时的透射率 T 模型：

$$T=\frac{4\sqrt{\varepsilon}}{\left(\sqrt{\varepsilon}+1\right)^2}$$

2. 土壤和土壤颗粒的介电特性、折射率公式的确定

(1) 土壤介电特性模型：

$$\sqrt{\varepsilon}=\theta\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{w}}}+\frac{\rho}{G}\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{s}}}+\left(1-\frac{\rho}{G}-\theta\right)\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{a}}}$$

(2) 折射率模型：

$$n=\theta\, n_{\mathrm{w}}+\frac{\rho}{G}n_{\mathrm{s}}+\left(1-\frac{\rho}{G}-\theta\right)n_{\mathrm{a}}$$

式中，ε、ε_{w}、ε_{s}、ε_{a} 分别为土壤、水、土壤颗粒和空气的介电特性；n、n_{w}、n_{s}、n_{a} 为对应的折射率；ρ、G、θ 分别为土壤的干容重、比重和含水量。

(3) 土壤颗粒的介电特性公式：

$$\left(\frac{\varepsilon}{\rho}\right)^a=\theta_1\left(\frac{\varepsilon_1}{\rho_1}\right)^a+\theta_2\left(\frac{\varepsilon_2}{\rho_2}\right)^a+\theta_3\left(\frac{\varepsilon_3}{\rho_3}\right)^a$$

式中，$\varepsilon_1,\varepsilon_2,\varepsilon_3$ 分别为 SiO_2, Al_2O_3, Fe_3O_4 的介电常数；ρ_1,ρ_2,ρ_3 为对应的密度；$\theta_1,\theta_2,\theta_3$ 为对应的重量百分含量；a 为反映其结构组成的参数。

土壤中农用化合物随地表径流迁移的计算模型

沈冰，王全九，李怀恩等：土壤中农用化合物随地表径流迁移研究评述．水土保持通报，1995，15(3)

(1) 迁移到径流中的化合物质量 M 模型：

$$M=(aS+b)E-cL^mS^mS^eq^n$$

式中，S 为坡度；E 为单位降雨的动能；L 为坡长；q 为单位面积上的径流率；a,b,e,m,n 为常数。

(2) 农用化合物迁移转化数学模型：

非均匀混合模型：

$$\beta=\exp(-bz)$$

$$C_s=aC$$

$$C_i^1(\theta_i+aS_i)=C_i^2(\theta_i+aS_i+\beta_i\Delta t)$$

$$C_r^2=\sum_{i=1}^{20}\beta_iC_i^2$$

式中，β 为混合程度系数；z 为土层深度；C_s 为吸附于土壤颗粒上的化合物浓度；C 为土壤溶液的化合物浓度；a,b 为常数；C_i^1、C_i^2 分别为第 i 层土混合前、后的化合物浓度；θ_i 为第 i 层土的含水量；S_i、β_i 分别为第 i 层土的土壤溶液质量和混合程度；C_r^2 为混合后的浓度。

临界坡度的能量公式

靳长兴：论坡面侵蚀的临界坡度．地理学报，1995，50(3)

根据动能原理，水流的动能可表达为：

$$E_{\mathrm{v}}=\frac{1}{2}\rho\left(2ga^2\right)^{\frac{-1}{1.5+b}}k^{\frac{-2b}{1.5+b}}q^{\frac{2.5-3b}{1.5+b}}\sin^{\frac{1}{1.5+b}}\beta\cos^2\beta$$

式中，a,b 为常数；ρ 为水体密度；q 为单宽流量；g 为重力加速度；β 为坡面与水平面的夹角。由此式可知，当水深由浅变深时，临界坡度由 24° 增加到 29°。

含水量与基质吸力的关系模型

党进谦，李靖：非饱和黄土含水量与基质吸力的关系．水土保持通报，1995，15(4)

$$w=as^{-b}-cs^{-d}$$

式中，w 为土壤含水量；s 为基质吸力；a,b,c,d 为随取土点而变化的统计参数。

土地退化程度指数

文子祥：晋陕蒙接壤区土地退化及其治理预测．自然资源，1995，5

$$d_i=\sum_{i=1}^{n}S_iP_i$$

式中，S_i 为 i 类各级土地退化的等级数值与该类各级中最大值的比值；P_i 为 i 类各级土地退化面积占其行政区面积的比值。

土壤侵蚀模数

倪兴实，田中雨等：卫片目视解译在土壤侵蚀现状调查中的应用．水土保持通报，1996，16(1)

$$\text{侵蚀模数}=\frac{(a_1-a_2)\times\text{土壤容重}}{t_1-t_2}$$

式中，a_1、a_2 为不同开垦年限的两块地的耕层厚度；t_1、t_2 为对应的开垦年限。

风蚀率 E 与土壤含水率 M 的关系模型

董志宝，陈渭南，李振山等：风沙土水分抗风蚀性研究．水土保持通报．1996，16(2)

$$E=C+DM^{-2}$$

式中，C、D 为回归系数。

气体排放量计算方法

董云社，彭公炳，李俊：温带森林土壤 CO_2、CH_4、N_2O 时空特征．地理学报．1996，51(增刊)

$$F=\frac{V}{A}\cdot D\frac{\Delta m}{\Delta t}$$

式中，V 为观测箱子的容积；A 为观测箱所包围的面积；D 为箱内气体密度；$\frac{\Delta m}{\Delta t}$ 为气体在观测时间内浓度随时间变化的直线斜率。

土壤侵蚀因子定量评价模型

王万忠，焦菊英：中国的土壤侵蚀因子定量评价研究．水土保持通报，1996，16(5)

1. 降雨

(1) 侵蚀累积百分比 P_Q 模型：

$$P_Q=114.5-1.972P$$

式中，P 为相应的雨量标准。

(2) 降雨强度 I 模型：

$$I=2.514T^{-0.650}$$

式中，T 为起流历时。

(3) 降雨量 P 模型：

$$P=2.514t^{0.35}$$

式中，t 为降雨历时。

(4) 降雨动能模型：

$$E_1=10.375i_1^{0.562}$$
$$E_2=23.49i_2^{0.27}$$

式中，E_1 为模拟降雨的雨滴动能；E_2 为天然降雨的雨滴动能；i_1，i_2 分别为各自的降雨强度。

2. 土壤

(1) 平均入渗率 P 与土壤含水率 W 的关系模型：

$$P=1.525-0.049W$$

(2) 分散系数 K 和结构系数 K_0 模型：

$$K=\frac{a}{b}\times100\%$$
$$K_0=\frac{b-a}{b}\times100\%$$

式中，a 为微团聚体测定中<0.001mm 的黏粒含量；b 为机械分析中<0.001mm 的黏粒含量。

3. 地形

大于 9%坡度的地形因子 S_1 模型：

$$S_1=\frac{\lambda}{22}\left(\frac{\alpha}{5.16^{\circ}}\right)^{1.3}$$

4. 植被

林下降雨量 P_t 与降雨量 p 的关系模型：

$$P_t=mp^n$$

式中，m、n 为待定系数。

5. 耕作

黄土高原水平梯田的田面宽度 B 模型：

$$B=H(\cos\alpha-\cos\beta)$$

式中，α 为原地面坡度；β 为梯埂侧坡；H 为梯埂高度。

土壤侵蚀模型

吴礼福：黄土高原土壤侵蚀模型及其应用．水土保持通报，1996，16(5)

$$E=E_s+E_v=a_0+H_s^{a_1}\left(R_{30}/R_{标准}\right)^{a_2}\left(L_s/d\right)^{a_3}e^{-a_4p}\cdot F_s[\sin(2\alpha)]^{a_5}+b_0H_v^{b_1}\left(L_vD_s\right)^{b_2}+e$$

式中，E 为土壤侵蚀模数；E_s 为坡面侵蚀模数；E_v 为沟谷侵蚀模数；$R_{30}/R_{标准}$ 表示多年平均最大 30min 降雨量与当地标准暴雨 30min 雨量之比；H_s 为坡面径流量；H_v 为沟谷径流深；L_s 为坡长；L_v 为沟谷长度；α 为坡度；D_s 为沟谷密度；p 为林草地的植被覆盖度；d 为粒径；F_s 为坡耕地因素；a_0，a_1，a_2，a_3，a_4，a_5，b_0，b_1，b_2 为由回归确定的参数；e 为误差。

耕作的数值模型

杨邦杰：耕作的数值模型及其应用．生态学报，1996，16(6)

土壤水热运动方程——Philip 方程：

$$C_w \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \nabla \cdot (K_w \nabla \Psi) + \nabla \cdot (D_{Tv} \nabla T) + \frac{\partial K}{\partial z}$$

$$C_h \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \rho_L L \nabla \cdot (K_v \nabla \Psi)$$

式中，C_w 为比水容量；Ψ 为土壤水的基质势；t 为时间；D_{Tv} 为与温度梯度有关的水汽扩散率；T 为土壤温度；K 为非饱和土壤导水率；z 为向上为正的高度坐标；C_h 为土壤热容量；λ 为导热率；ρ_L 为液态水密度；L 为水的气化潜热；$K_w = K + K_v$，K_v 为水汽在基质势梯度下的当量导水率。

风蚀物随高度的分布模型

哈斯：河北坝上地区土壤风蚀物理化性质初步研究．水土保持通报，1997，17(1)

$$M = A \cdot B^Z$$

式中，M 为各层风蚀物含量；Z 为高度；A、B 为回归系数。

土壤表面蒸发阻力模型

杨邦杰，Blackwell P S, Nicholson D F：土壤表面蒸发阻力模型与田间测定方法．地理学报，1997，52(2)

(1) 单层模型：当地表饱和时，暂时设土壤表面蒸发阻力 $r_s = 0$。当表面土壤开始变干时，设想蒸发面不断向下扩展，其距地面的距离为 $z(t)$(m)，t 为时间(s)。即蒸发是在土壤中进行的，水汽从蒸发面扩散到地表时受到一个阻力 $r_s(\mathrm{s \cdot m^{-1}})$ 的作用。若 r_a 为空气动力学阻力，则蒸发率可表达为：

$$E_s = \frac{H_s - H_a}{r_a + r_s}$$

式中，H_s 为土壤表面的空气湿度 $(\mathrm{kg \cdot m^{-3}})$；而 H_a 为参考高度上的空气湿度 $(\mathrm{kg \cdot m^{-3}})$。

根据扩散定律，从蒸发面到 z 区内的水汽通量为

$$q_v = D_v \frac{\Delta \rho_v}{z} = \frac{\Delta \rho_v}{r_s}$$

式中，D_v 为水汽在干土中的扩散率 $(\mathrm{m^2 \cdot s^{-1}})$；$\Delta \rho_v$ 为 z 区内的水汽浓度的变化 $(\mathrm{kg \cdot m^{-3}})$；$r_s = \dfrac{z(t)}{D_v}$。

(2) 双层模型：当土壤表面风干时，在干土与湿土之间有一过渡层，其水分已失去连续性，水汽越过水-气边界的阻力为 r_{s1}；水汽越过干土层的阻力为 r_{s2}，则总的蒸发阻力为：

$$r_s = r_{s1} + r_{s2}$$

(3) 经验模型：根据上述模型计算土壤表面蒸发阻力是困难的。由于土壤表面的温度与表层水分可以用遥感的方法测定，所以，采用以表层水分与温度为变量的阻力模型最为方便。当表层土壤逐渐风干时，蒸发率逐渐变小，即：

$$r_s = a\left(\frac{\theta_s}{\theta_1}\right)^b$$

式中，a，b 是根据实测的 r_s 拟合的参数；θ_1 为表层 0~1cm 平均含水量；θ_s 为表层土壤饱和含水量。当表层土壤饱和$(\theta_1 = \theta_s)$时，$r_s = a$ 为最小阻力，即水汽越过水-大气边界的阻力。如果忽略这一最小阻力，则：

$$r_s = -a + a\left(\frac{\theta_s}{\theta_1}\right)^b$$

(4) 田间测定与计算方法：如果 E_m 是测定的蒸发率，H_s 是土壤表层(0~1cm)的空气湿度 $(\mathrm{kg \cdot m^{-3}})$，$H_a$ 是空气湿度 $(\mathrm{kg \cdot m^{-3}})$，则：

$$E_m = \frac{H_s - H_a}{r_a + r_s(\theta_1)}$$

$$H_s = H_o \cdot \exp \frac{\varphi g}{R(T_s + 273.16)}$$

$$H_o = \frac{1.232 \exp \dfrac{17.27 T_s}{T_s + 237.3}}{T_s + 273.16}$$

$$r_a = \frac{\left(\ln \dfrac{Z}{Z_0}\right)^2}{0.16u}$$

式中，φ 为土壤基质势；g 为重力加速度；R 为通用气体常数；T_s 为地表温度；H_o 是温度为 T_s 时土壤的饱和湿度；Z 为测定风速 u 的参考高度；Z_0 为地表的粗糙度。

土壤侵蚀的核示踪技术

石辉，刘普灵，田均良：核示踪技术在土壤侵蚀研究中的应用．水土保持通报，1997，17(3)

(1) ^{137}Cs 示踪法——侵蚀量模型：

$$A = \frac{B - C}{B} \cdot \frac{D}{E}$$

$$E_n = D_p \cdot B_S \cdot \frac{kR_c - R_s}{kR_c}$$

式中，A 为年平均土壤侵蚀速率；B 为背景值区 15cm

厚土层的 ^{137}Cs 总活度；C 为侵蚀区 15cm 厚土层的 ^{137}Cs 总活度；D 为单位面积 15cm 深土层重；E 为 ^{137}Cs 初始降落至采样年限；E_n 为净土壤侵蚀量；D_p 为平均耕层厚度；B_S 为耕层样品的土壤容量；k 为校正系数；R_c 为对照区 ^{137}Cs 的输入量；R_s 为样点 ^{137}Cs 的活度

(2) REE 示踪法的精度 E 模型：

$$E = 1 - \sum_{i=1}^{n} W_i / W_e$$

式中，E 为相对误差；n 为地形部位的划分段数，即示踪元素的种类；W_i 为第 i 个地形部位的侵蚀量；W_e 为示踪小区的总侵蚀量。

(3) ^{210}Pb 示踪法——$^{210}Pb_{ex}$ 在沉积物中的分布公式：

$$\frac{\partial \rho A}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\frac{D_B \partial \rho A}{\partial z} - \frac{S \partial \rho A}{\partial z} - \lambda \rho A$$

式中，A 为 $^{210}Pb_{ex}$ 的浓度；D_B 为沉积物混合速率；t 为时间；z 为深度；ρ 为沉积物的密度；S 为沉积速率；λ 为 ^{210}Pb 的衰变常数。

土壤-植物-大气系统的综合计算与模拟

刘昌明：土壤-植物-大气系统水分运行的界面过程研究．地理学报，1997，52(4)

(1) 土壤水运动基本方程：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(D(\theta)\frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - \frac{\partial K}{\partial z} - S(z,t)$$

式中，D 和 K 分别为扩散率和导水率；θ 为 t 时 z 深度的土壤含水率；$S(z,t)$ 为植物根系吸水速率。

(2) 土-根界面：

根系吸水率可表达为：

$$S = \frac{\Delta \phi_{rs}}{\Delta R_{rs}}$$

式中，$\Delta \phi_{rs}$ 和 ΔR_{rs} 为土壤与根之间的水势差和阻力。

(3) 植-气界面：

冠层与大气界面间阻力(Rc)的模型为

$$Rc = \frac{Rc_{\min}}{F(St)F(D)F(T)F(\theta)}$$

式中，$Rc_{\min}$ 为最小冠层表面阻力；$F(St)$、$F(D)$、$F(T)$、$F(\theta)$ 分别为辐射、饱和水汽压、温度和土壤水分等的胁迫函数。

(4) 土-气界面：

当叶面指数等于3 时：

$$\frac{E_s}{ET} = 0.347\,745\,54 + 0.101\,887\,99 \ln \theta$$

式中，E_s 为棵间裸土蒸发；θ 为土壤含水量；ET 为蒸散总量(土壤蒸发与植物蒸散是同时发生的，因此，常常把这二者的结合称为蒸散)。

根系层土壤水分动态变化模型

展绍忠，蔡焕杰：大气 CO_2 浓度增加对春小麦冠层温度、蒸发蒸腾与土壤剖面水分动态影响的试验研究．生态学报，1997，17(4)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z}\left[D(\theta)\frac{\partial \theta}{\partial Z} \right] - \frac{\partial K(\theta)}{\partial Z} - S_r(Z,t)$$

式中，$S_r(Z,t)$ 为作物根系吸水率；θ 为容积含水率；Z 为深度坐标；t 为时间；$D(\theta)$ 为土壤水分扩散率；$K(\theta)$ 为导水率。

三种土壤铅和镉的质量的分析系数及金属含量计算公式

董双双，陈静生：三种土壤铅和镉的质量基准初步研究．地理研究，1997，16(4)

(1) 分析系数计算公式：

$$K_d = [M]_s / [M]_w$$

式中，K_d 为分析系数；$[M]_s$ 为土壤中的金属浓度；$[M]_w$ 为溶液中的金属浓度。

(2) 土壤中金属的最高允许含量计算公式：

$$Q = C_w \left[K_d + \frac{nP}{D_s(1-n)} \right]$$

式中，C_w 为饮用水标准；n 为土壤的孔隙度；p 为土壤中水的饱和度；D_s 为土壤颗粒物的密度；Q 为最高容许含量。

单位土层根系吸水效率

冯广龙，刘昌明：人工控制土壤水分剖面调控根系分布的研究．地理学报，1997，52(5)

$$U_i = \frac{WL}{WT} \cdot \frac{RL}{RT}$$

式中，WL 为根系在 i 层中吸水量；WT 为根系在土壤剖面中总吸水量；RL 为 i 层土壤中根长密度；RT 为总根长密度。

淤地坝减洪减沙效益计算模型

刘勇，冉大川，罗全华等：晋西北地区淤地坝减洪减沙效益计算方法研究 水土保持通报，1997，17(5)

(1) 淤地坝减沙量计算：

淤地坝总减沙量 $\Delta W_{S坝}$ 模型：

$$\Delta W_{S坝} = \Delta W_{Sg年} + \Delta W_{Sf年}$$

$$\Delta W_{Sg年} = KW_{si}(f_{i+(n-1)} - f_{i-1})(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)$$

$$\Delta W_{Sf年} = 1.75FW_{si}$$

式中，$\Delta W_{Sg年}$ 为某计算年内淤地坝的总拦沙量；$\Delta W_{Sf年}$ 为某年淤地坝的减蚀量；K 为控制参数；f_{i-1} 为上一年淤地坝累积面积；$f_{i+(n-1)}$ 为尚未淤满的淤地坝淤成后的累积坝地面积；W_{si} 为计算流域侵蚀模数；α_1 为人工填垫坝地在坝地面积中所占的比例；α_2 为推移质在坝地拦泥总量中所占的比例；F 为某年所有淤地坝的总面积

(2) 淤地坝减洪量计算：

淤地坝减洪量 $\Delta W_{坝}$ 模型：

$$\Delta W_{坝} = \Delta W_1 + \Delta W_2$$

$$\Delta W_1 = R \cdot \left(\Delta W_{Sg年}\right)$$

$$\Delta W_2 = W_{洪} \cdot \eta \cdot f_{i-1}$$

式中，ΔW_1 为淤地坝的拦洪量；ΔW_2 为已淤平地坝的减洪量；R 为流域淤地坝拦洪时的洪沙比；$W_{洪}$ 为计算流域天然状况下的产洪模数；η 为减洪系数。

土壤侵蚀量的计算模型

吴永红，范权：陇东黄土高原沟壑区土壤侵蚀的 ^{137}Cs 法研究 水土保持通报，1997，17(5)

(1) 无分选农耕地土壤侵蚀量模型：

$$x_N = y_N\left(1 - \frac{\Delta H}{H}\right)^{N-1963}$$

式中，x_N 为土壤剖面 ^{137}Cs 的总量；y_N 为当地 ^{137}Cs 的背景值；H 为犁耕层厚度；ΔH 为土壤年均流失厚度；N 为取样年份

(2) 非农耕土壤剖面侵蚀量模型：

$$A_h = A\left(1 - e^{-\lambda h}\right)$$

式中，A_h 为土壤剖面中某一深度 h 以上 ^{137}Cs 总量；A 为当地 ^{137}Cs 的背景值；λ 为 ^{137}Cs 下渗系数。

滑坡活动的活跃性模型

李树德：武都白龙江流域滑坡活动性探讨 水土保持通报，1997，17(6)

$$\beta_i = \frac{\bar{S}_i(S - S_i - \Sigma + \bar{S}_i) - (S_i - \bar{S}_i)(\Sigma - \bar{S}_i)}{\bar{S}_i(S - S_i - \Sigma + \bar{S}_i) + (S_i - \bar{S}_i)(\Sigma - \bar{S}_i)}$$

式中，β_i 为第 i 种岩性的滑坡活跃度；$\bar{S}_i$ 为第 i 种岩性因滑坡破坏的面积；S_i 为第 i 种岩性出露面积；S 为研究区总面积；Σ 为因滑坡破坏的总面积。

农田土壤水分模型

谢云：黄土高原地区农田土壤水分模型及其对农作物的影响 地理研究，1997，16(增)

(1) 土壤水分主要平衡方程：

$$W_t - W_{t-1} - P - F - ET$$

式中，W_t，W_{t-1} 为时段始末土壤有效含水量；P 为相应时段降水量；F 为径流量；ET 为实际蒸散量。

(2) 作物实际耗水模型：

$$ET = \begin{cases} ET_0 & (W_B \leqslant W \leqslant W_c) \\ ET_0\left(\dfrac{W - W_B}{W_B - W_E}\right)^{Kt} & (W_E < W < W_B) \\ 0 & (W \leqslant W_E) \end{cases}$$

式中，ET 为作物实际耗水；W_C 为土壤田间持水量；W_E 为土壤凋萎湿度；W_B 为土壤临界持水量；W 为土壤含水量；ET_0 为潜在蒸散

(3) 径流产生条件：

$$F = C_R \cdot P \quad (P \geqslant P_B)$$

式中，C_R 为多年平均径流系数；P 为降水强度；P_B 为产生径流的临界降水强度

土壤中溶质运移模拟

许秀元，陈同斌：土壤中溶质运移模拟的理论与应用 地理研究，1998，17(1)

(1) 水动力弥散参数确定方法：

1) 毛细管模型：

$$D_L = \left(\frac{R}{48D_d}\right)^{V}$$

式中，D_L 为纵向弥散系数；R 为直毛细管的半径；D_d 为分子扩散系数；$\bar{V}$ 为毛细管内的平均速度

2) Bear 弥散系数计算公式：

$$D_{ij} = \alpha_T \overline{V} \delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_r) \frac{\overline{V}_i \overline{V}_j}{\overline{V}}$$

式中，D_{ij} 为弥散系数张量；α_L，α_r 分别为介质纵向及横向弥散度；$\overline{V}$ 为毛细管内的平均速度；δ_{ij} 为 Knonecker—δ 记号；$\overline{V}_i$、$\overline{V}_j$ 为质点瞬时速度相对平均速度在 i、j 方向上的分量。

(2) 宏观弥散问题：

$$\alpha^2 = 2\int \alpha_L \mathrm{d}x = 2\int f(\overline{x}) \mathrm{d}x$$

式中，$\alpha_L = f(\overline{x})\mathrm{d}x$ 为弥散度函数；$\overline{x}$ 为平均距离；α^2 为溶质空间分布的方差。

(3) Skopp 模型：

$$\frac{\partial A}{\partial x} = D_A \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} - V_A \frac{\partial A}{\partial x} - L(A-B)/(\theta A)$$

$$\frac{\partial B}{\partial x} = D_B \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} - V_A \frac{\partial B}{\partial x} - L(A-B)/(\theta B)$$

式中，A，B 分别为两层介质中溶液的溶质浓度；D_A、D_B 和 V_A、V_B 分别对应溶质 A 和 B 的弥散系数和速度；L 为质量交换系数。

(4) 多组分溶质运移计算公式：

$$(\theta R_i)\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\theta D \frac{\partial C_i}{\partial z}\right) v q_i \frac{\partial C_i}{\partial z} + (\rho / q_i)\sum_{j=i} h_{ij} \frac{\partial S_i}{\partial t}$$

$$q_i = 1 + \frac{1}{v_i S_i}\sum_{j=i} \gamma_j S_j$$

$$h_{ij} = 1 + \frac{1}{\gamma_i C_i}\sum_{j=i} \gamma_j S_j$$

$$h_{ij} = \frac{S_j}{C_i}$$

$$R_i = 1 + (\rho/\theta)\frac{h_{ij}}{q_i}$$

式中，γ_i、γ_j 为组分 i 和 j 的化合价；S_i、S_j 为组分 i 和 j 相互转化量；ρ 为流体溶液的密度；θ 为含水量；v 为达西速度。

(5) 确定性数学模型：

1）对流弥散型模型：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V_A \frac{\partial C}{\partial x}$$

2）考虑固相吸附时溶质运移的模型：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\rho}{\theta}\frac{\partial S}{\partial t} = D\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} - V\frac{\partial C}{\partial x}$$

式中，θ 为含水量；S 为固相的吸附量；ρ 为固相的容重。

3）考虑不动水体存在时的模型：

$$\frac{\partial \theta_m C_m}{\partial t} + \frac{\partial \theta_{im} C_{im}}{\partial t} = (\theta_m D)\frac{\partial^2 C_m}{\partial x^2} - \frac{\partial}{\partial x}(q C_m)$$

$$\frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \frac{\partial}{\theta_{im}}(C_m - C_{im})$$

式中，θ_m，θ_{im} 分别为可动水体和不动水体的含量；C_m，C_{im} 为可动水体与不动水体中溶质浓度；q 为达西速度。

(6) 黑箱模型：

$$S_{(t)} = A e_{(t)}$$

式中，A 为传递函数；$e_{(t)}$ 为输入；$S_{(t)}$ 为输出

土壤碳的动力过程

Bolker B M, Pacala S W, Parton W J et al：土壤还原作用的线性分析：对世纪模型的理解。Ecological Applications, 1998, 8(2)

下式是一个线性碳动力过程的紧凑型数学描述：

$$\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}t} = \delta(t)(MC)$$

式中，C 是每个区室碳的向量，$\delta(t)$ 是基于温度和湿度的分解系数，转移矩阵 M 的每一个元素 m_{ij} 表示物质从 j 区流向 i 区的比率。

衰变时间 $\tau(t)$：

$$\tau(t) = \int_0^t \delta(t)\mathrm{d}t$$

根据对角线模型，一个完整的碳动力学过程如下：

$$C_{tot}(t) = C_{tot}(0)\sum_i \{\varepsilon_i \exp[\lambda_i \tau(t)]\}$$

式中，$C_{tot}(t)$ 是总的碳含量，$C_{tot}(0)$ 是在开始时总的碳含量，ε_i 是向对角化土壤有机物层的碳，λ_i 是指分解特征值，$i=1,\cdots,8$ 表示不同的分解区室。

土壤 CO_2 排放模型

刘允芬：西藏高原农田土壤 CO_2 排放研究初报. 自然资源学报, 1998, 13(2)

$$Q_t=\frac{\Delta c}{\Delta t}\frac{V}{A}=\frac{\Delta c}{\Delta t}h$$

式中，Q_t 为 t 时土壤 CO_2 排放通量($\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$ 或换算为 $kg\cdot hm^{-2}\cdot h^{-1}$)；$\Delta c$ 为时间间隔 Δt 箱内 CO_2 浓度差($\mu mol\cdot m^{-3}$)；V 为箱子体积(m^3)；A 为被测土壤面积(m^2)；h 为箱子高度(m)。

土壤 CO_2 排放日总量面积可表示为：

$$Q_a=\int_{t_1}^{t_2}Q_t\mathrm{d}t$$

式中，Q_a 为单位面积土壤 CO_2 排放日总量($\mu mol\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$)；$t_1$、$t_2$ 分别为测定日的开始、结束时间。

土壤水分状况估算的彭曼公式

于东升，史学正：我国土壤水分状况的估算　自然资源学报，1998，13(3)

$$E_0=\frac{\Delta\cdot H+\gamma\cdot E_a}{\Delta+\gamma}$$

式中，E_0 为潜在蒸发量；Δ 为气温 T_a 时的饱和水汽压曲线斜率(mb·℃$^{-1}$)；E_a 为实际水汽压；γ 为气温 T_a 时干湿球湿度公式常数；R_a 为无大气时到达单位面积地面上的太阳总辐射量；r 为下垫面反射率；n/N 为日照百分率；δT_a^4 为气温 T_a 时的黑体辐射；$H=R_a(1-r)\left(0.18+0.55\frac{n}{N}\right)-\delta Ta^4\left(0.56-0.092ed^{\frac{1}{2}}\right)\left(0.10+0.90\frac{n}{N}\right)$，$E_a=0.35\times\left(1+\frac{u}{100}\right)(e_a-e_d)$，$e_a$ 为气温 T_a 时的饱和水汽压(mm)，e_d 为平均水汽压(mm)，u 为高度 2 m 处的风速。

侵蚀模型

景可，李钜章，李凤新：黄河中游侵蚀量及趋势预测　地理学报，1998，53(增刊)

$$\lg(T_m)=2.35+6.31/(5/D_{mx}+9/Z_x+9/W_x+3/P_x)+R_x$$
$$(r=0.83,F=344.44)$$

式中，T_m 为侵蚀模数；Z_x 为植被盖度；W_x 为地表组成物；$D_{mx}=1.5/(0.9/G_m+10/Q_{sd})$ 为地形指标，G_m 为沟谷密度、Q_{sd} 为切割深度；$P_x=\mathrm{Ln}(P_s)$ 为降水指标、P_s 为汛期降水量；$R_x=\lg(1+1.5G_{>15}/100)$ 为人为因子指标、$G_{>15}$ 为>15° 的坡耕地占土地面积的百分数

土壤水分及土壤-大气界面对麦田水热传输的计算公式

刘苏峡，莫兴国，李俊等：土壤水分及土壤-大气界面对麦田水热传输的作用　地理研究，1999，18(1)

(1) 土壤水分计算公式：

$$A_{sm}=\sum_{i=1}^{I}(\theta_{vi}-\theta_{i\omega})d_i$$

式中，A_{sm} 为计算土层内的有效水分；$i=1$、…、I，为第 i 个土层深度；$\theta_{i\omega}$ 为第 i 层凋萎体积含水量；d_i 为第 i 层土壤深度；θ_{vi} 为第 i 层体积含水量，其中，$\theta_{vi}=\theta_{gi}(\gamma_s/\rho_\omega)$，$\theta_{gi}$ 为由土钻取土得到的土壤重量含水量，γ_s 为土壤干容重，ρ_ω 为水的密度。

(2) 麦田生态系统土壤-大气界面能量传输的平衡方程：

$$R_n=H+LE+G$$

式中，R_n 为到达冠层表面上的净辐射；G 为土壤热通量；$H=-\rho C_P K_H(\partial T/\partial z)$，为显热通量；$LE=-(\rho C_P/\gamma)K_\omega(\partial e/\partial z)=(R_n-G)/(1+\beta)$ 为潜热通量。ρ 为空气密度；C_P 为空气定压比热；K_ω 和 K_H 分别为潜热和显热通量的湍流交换系数；T 和 e 分别为空气温度和水汽压；γ 为干湿球湿度表方程中常数；β 为波文比，$\beta=\gamma(\Delta T/\Delta e)$。

(3) 大气水势计算公式：

$$\psi_a=-(RT/V_\omega)\ln(e/e_s)$$

式中，ψ_a 为大气水势，V_ω 为水的克分子体积；R 为气体常数；T 为大气绝对温度；e 为实际水汽压，$e=e_s(T_\omega)-\gamma(T_d-T_w)$；$e_s(T_\omega)=6.1078\exp[17.27T_\omega/(237.3+T_\omega)]$，$T_\omega$ 和 T_d 分别为波文比中上下两组湿球、干球温度的平均值；e_s 为饱和水汽压，$e_s=e_s(T_d)$

土壤侵蚀发展动态 SD 模型

张汉雄，邵明安：陕晋黄土丘陵区土壤侵蚀发展动态仿真研究　地理学报，1999，54(1)

(1) 人口：

$$POP.K=POP.J+DT\times POR.JK$$

式中，POP 为总人口；POR 为人口增长率。

(2) 耕地面积与粮田面积：

$$FMLK=FMLJ+DT(IFMJK-DFMJK)$$

$$GRN.K = GRN.J + DT(SND.K / RUT.K)$$

$$GRA.K = \min(0.8FML.KPR.K, GRN.K)$$

式中，*FML*、*GRA*、*GRN* 分别为耕地、粮田和需粮播种面积；*IFM*、*DFM* 分别为增加和减少的耕地面积；*PR* 为复种指数；*SND* 为粮食供需差；*RUT* 为预测粮食亩产量。

(3) 林地面积：

$$FRS.K = FRS.J + DT(IFR.JK - DFR.JK)$$

$$IFRKL = FRS.K \times XLIP(O, P_4, FRS.K, UFRS)$$

式中，*FRS*、*UFRS* 分别为林地面积与宜林面积；*IFR* 为年造林保存面积；*DFR* 为年采伐面积；P_4 为造林发展速度。

(4) 载畜量：

$$AMHK = AMHJ + DT \times (IAMJK - DAMJK)$$

式中，*AMH*、*IAM*、*DAM* 分别为牧畜存栏数、年增加数和出栏数。

(5) 轻度侵蚀面积：

$$LES.K = LES.J + DT \times (ILE.JK - DLE.JK - CLE.JK)$$

式中，*LES*、*ILE*、*DLE* 分别为轻度侵蚀面积、轻度侵蚀增加面积和治理面积；*CLE* 为由轻度向中度发展的转移面积。

(6) 中度侵蚀面积：

$$MES.K = MES.J + DT \times (CLE.JK - DME.JK - CMS.JK)$$

式中，*MES* 为中度侵蚀面积；*DME* 为治理的中度侵蚀面积；*CMS* 为中度向强度侵蚀发展的转移面积。

(7) 强度侵蚀面积：

$$SES.K = SES.J + DT(CMS.JK - DSE.JK)$$

式中，*SES* 为强侵蚀面积；*DSE* 为治理减少的强侵蚀面积。

(8) 土壤侵蚀总量：

$$SEQ.K = P_8 \times LES.K + P_9 \times MES.K + P_{10} \times SES.K$$

式中，P_8、P_9、P_{10} 分别为轻度、中度和强度侵蚀的平均侵蚀模数

土壤碎屑过程控制 ^{15}N 示踪物向森林植被移动的估算公式

Currie W S, Nadelhorrer K J, Aber J D: 土壤碎屑过程控制 ^{15}N 示踪物向森林植被的移动 Ecological Applications, 1999, 9(1)

(1) 森林枯枝落叶池的质量损失模型：

$$\Delta L_i(t) = \gamma_c \gamma_l L_i (1 - \exp[-k_{L_i}(t)])$$

式中，L_i 是干燥的非木本枯枝落叶；$k_{L_i}(t)$ 是腐烂常数，是一个细根和落叶的全部枯枝落叶的 L_{CI}（木质纤维素指数)随时间变化的函数；γ 是腐烂速率的修正值；γ_c 是一个表示温度和湿度对腐烂速率影响的因子，$\gamma_c = \frac{T_{ae}(t)}{T_{ae_{ann}}} \exp\left[0.00189(T_{ae_{ann}} - T_{ae_{ann}}')\right]$，AET 是实际的土壤水分蒸发蒸腾损失总量；$T_{ae_{ann}}$ 是每年实际的土壤水分蒸发蒸腾损失总量；$T_{ae_{ann}}'$ 是腐烂常数来源地每年实际的土壤水分蒸发蒸腾损失总量；γ_l 是表示不同土层对腐烂速率的影响的因子。

(2) 模型中每一土层的潮湿池最先遭受质量损失：

$$\Delta H(l,t) = \gamma_c \gamma_H H[1 - \exp[(-k_H)]$$

式中，$H(l,t)$ 是土层(l)中的潮湿物质；k_H 是潮湿物质的腐烂常数；γ_H 是一个表示不同土层对腐烂速率影响的因子。

(3) 总氮的同化作用 $[F_{A,L_i}(l,t)]$ 被模拟为在各种培养基上不同效率的微生物生物量生产：

$$F_{A,L_i}(l,t) = \frac{n_m e_{L_i}}{1 - e_{L_i}} (1 - \lambda_{L_i}) \Delta L_i$$

式中，n_m 是单位数量微生物中的氮浓度；λ_{L_i} 表示由于从每个枯枝落叶池(在矿质土层中 $\lambda = 0$)中滤去可溶性有机物(DOM)引起的质量损失部分；e 是微生物效率，被定义为微生物生产并释放到培养基中的生物量的比率，它带有一个下标，指出培养基类型。

(4) 每一个月中总的氮矿化度 $[F_{M,L_i}(t)]$：

$$F_{M,L_i}(t) = F_{A,L_i}(t) - f_{A,L_i}(t)$$

式中，$f_{A,L_i}(t)$ 是每月氮同化作用的净流量。

土壤肥力综合指标 I_{FI} 模型

张夫贵，宋永昌，由文辉：浙江天童植物群落次生演替与土壤肥力的关系 生态学报，1999，19(2)

$$I_{FI} = W_i F(X_i)$$

式中，W_i 为各肥力因子的权重向量；$F(X_i)$ 为各肥力因子的隶属度值

土壤有效碳模型

沈宏，曹志洪，胡正义：土壤活性有机碳的表征及其生态效应 生态学杂志，1999，18(3)

$$v=[V_{max}(S_A+AC)](Km_2+S_A+AC)^{-1}$$
$$v=(V_mS_A)(Km_1+S_A)^{-1}+B$$

式中，S_A 为添加的葡萄糖浓度；B 为基础呼吸率；Km_1，Km_2 为常数

土壤水分蒸发蒸腾损失总量(ET)估算模型

Bridgham S D, Pastor J, Updegraff K et al：北方泥炭地中生态系统对温度和能量流动的控制 Ecological Applications, 1999,9(4)

$$T_e=P+W_i-W_o$$

式中，P 等于降雨输入量，W_i 等于输入土壤用于保持地下水位的水分，W_o 等于降雨后填洼水量

面蚀临界坡度的理论分析模型

胡世雄，靳长兴：坡面土壤侵蚀临界坡度问题的理论与实验研究，地理学报,1999，54(4)

(1) 能量分析法：

$$E_v=\frac{1}{2}\rho(2ga^2)^{\frac{1}{1.5+b}}\cdot k^{\frac{2b}{1.5+b}}q^{\frac{2.5+3b}{1.5+b}}\times$$
$$\sin^{\frac{1}{1.5+b}}\beta\cos^{\frac{1}{1.5+b}}\beta\cos^2\beta$$

式中，a，b 为常数；p 为水的密度；q 表示单宽流量；g 为重力加速度；k 为大于等于 84%的床面颗粒的粒径；β 为坡面与水平面的夹角

(2) 泥沙运动力学分析方法：

$$\phi=\phi_1+\phi_2=0.1\frac{\theta^{5/2}}{f}+8(\theta-0.047)^{2/3}$$

$$\theta=\frac{F}{G}=\frac{\rho gh\sin\beta\cos\beta d^2}{(\rho_s-\rho)gd^3}=\frac{\sin\varphi}{\sin(\varphi-\beta)}$$

式中，ϕ 为坡面流搬运泥沙总量；f 为无因次摩擦系数；ρ_s 为泥沙容重；ρ 为水的容重；F 为总曳引力；G 为水中的颗粒重量；d 为颗粒的直径；φ 为水下泥沙颗粒内摩擦角；h 为水深；ϕ_2 为泥沙搬运的推移质总量；ϕ_1 为坡面流搬运的悬移质总量；θ 为无因次床面剪切率

土壤可蚀性计算公式

刘宝元等：土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用 自然资源学报，1999，14(4)

土壤可蚀性因子 K：

$$K=\left[2.1\times10^4M^{1.14}(12-OM)+A\right]/100 \quad (1)$$

式中，$A=3.25(s-2)+2.5(p-3)$ M 为(粉沙+极细沙)%与(100－黏粒)%之积；OM 为土壤有机质含量；s 为结构系数；p 为渗透性等级

侵蚀/生产力影响模型 $EPIC$ 用式(2)计算土壤可蚀性：

$$K=\{0.2+0.3\exp[0.0256\,SAN(1-SIL/100)]\}\times$$
$$\left(\frac{SIL}{CLA+SIL}\right)^{0.3}\left[1.0-\frac{0.25C}{C+\exp(3.72-2.95C)}\right]\times$$
$$\left[1.0-\frac{0.7SN1}{SN1+\exp(-5.51+22.9SN1)}\right] \quad (2)$$

式中，SAN、SIL、CLA 和 C 是沙粒、粉粒、黏粒和有机碳含量(%)；$SN1=1-SAN/100$

修正土壤流失方程建议：温带中质地土壤用式(1)；热带火山灰土壤用式(3)；对含有2:1型晶架结构类黏土矿物的土壤，应该用式(4)和式(5)；如果不属于上述任何一种情况，而且又没有足够的资料，建议选择式(6)和式(7)。

$$K=-0.03970+0.00311x_1+0.00043x_2+$$
$$0.00185x_3+0.00258x_4-0.00823x_5 \quad (3)$$

式中，x_1 是大于 0.250mm 的非稳定团聚体的比例；x_2 是修订的粉粒(0.002～0.1mm)含量与修订的沙粒(0.1～2mm)含量之积；x_3 是基础饱和度；x_4 是原土中粉粒含量；x_5 是修订的沙粒含量

$$K=-0.204+0.385x_6-0.013x_7+$$
$$0.247x_8+0.003x_2-0.005x_9 \quad (4)$$

$$K=0.004+0.00023x_{10}-0.108x_{11} \quad (5)$$

式中，x_6 为团粒系数；x_7 是土壤中蒙脱石的含量；x_8 是深度为 50～125mm 土层的平均容重($g\cdot cm^{-3}$)；x_9 是土壤分散率；x_{10} 是修订的粉粒(0.002～0.1mm)含量与修订的沙粒(0.1～2mm)含量之积；x_{11} 式土壤中用 CDB (柠檬酸盐-硫酸盐-碳酸盐)可提取的氧化物(Al_2O_3，Fe_2O_3)的百分比

$$K = 7.594\left\{0.0034 + 0.0405\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\lg D_g + 1.659}{0.7101}\right)^2\right]\right\} \quad (6)$$

$$K = 7.594\left\{0.0017 + 0.0494\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\lg D_g + 1.675}{0.6986}\right)^2\right]\right\} \quad (7)$$

式中，D_g 是几何平均粒径。

非饱和土壤物理特性数据的数理基础分析模型

张光辉：非饱和土壤物理特性数据处理软件 APPIA 的数理基础分析。水土保持通报，1999，19(4)

(1) 迭代法计算 $h_m(\theta)$——非饱和或部分饱和土壤的水分运动模型：

$$C\left(\frac{\partial h}{\partial t}\right) = \frac{\partial}{\partial z}\left[K\left(\frac{\partial h}{\partial \theta}\right) - K\right]$$

式中，C 为土壤比水容量；K 味道水率；h 为水头；t 为时间；z 为垂直坐标，向下为正。

(2) 用水流通量计算 K(m)

1) 水流通量模型：

$$V_{t-1/2,i+1/2} = \frac{1}{\tau_t - \tau_{t-1}}\sum_{j=1}^{i} a_j\left(\theta_{t-1,j} - \theta_{t,j}\right)$$

式中，$V_{t-1/2,i+1/2}$ 为时段 $t-1$ 到 t 不同室间水流通量；τ_t 为记录时刻；a_j 为 j 室高度。

2) 压力水头梯度模型：

$$\frac{\partial h_m}{\partial z} \approx \frac{\Delta h_{m,t-1/2,i+1/2}}{\Delta z} = \frac{-\sqrt{h_{m,t,i-1}h_{m,t-1,i+1}} + \sqrt{h_{m,t,i}h_{m,t-1,i}}}{z_{i+1} - z_i}$$

(3) 持水模型：

1) Brooks 和 Corey 持水模型：

$$\theta = \begin{cases}\theta_r + (\theta_s - \theta_r)(\alpha h)^{-\lambda} & (\alpha h > 1)\\ \theta_s & (\alpha h \leqslant 1)\end{cases}$$

式中，θ_s 为残余含水量；θ_r 为饱和含水量；α 为经验常数，其倒数为进气值或气泡压力；λ 为孔隙分布函数，它影响持水曲线函数的斜率。

2) van Genuchten 持水模型：

$$S_e = \frac{1}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^m}$$

式中，S_e 为饱和度，其定义为：$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$；$\alpha$、$n$ 和 m 为影响持水曲线的经验常数。

(4) 导水模型：

1) Mualem 模型：

$$K(h) = \frac{K_S\left\{1 - (\alpha h)^{mn}\left[1 + (\alpha h)^n\right]^{-m}\right\}^2}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^{ml}}$$

$$D(S_e) = \frac{(1-m)K_S S_e^{l-1/m}}{\alpha m(\theta_s - \theta_r)}\left(A^{-m} + A^m - 2\right)$$

$$(m = 1 - 1/n)$$

式中，$A = 1 - S_e^{1/m}$；$K(h)$ 为导水率；$D(S_e)$ 为扩散率；l 为土壤空隙连接系数；K_S 为饱和导水率。

2) Burdine 导水模型：

$$K(S_e) = K_S S_e^l\left[1 - \left(1 - S_e^{1/m}\right)^m\right]$$

$$D(S_e) = \frac{(1-m)K_S S_e^{l-(m+1)/2m}}{2mn(\theta_s - \theta_r)} \times \left[\left(1 - S_e^{1/m}\right)^{-(m+1)/2} + \left(1 - S_e^{1/m}\right)^{(m-1)/2}\right]$$

$$(m = 1 - 2/n)$$

式中，$K(S_e)$ 为导水率；$D(S_e)$ 为扩散率。

吸附等温方程

尹澄清，邵霞，王星：白洋淀水陆交错带土壤对磷氮截留容量的初步研究。生态学杂志，1999，18(5)

$$C/S = \frac{1}{KS_{max}} + \frac{C}{S_{max}}$$

式中，C 为水相中的磷浓度；S 为土壤对磷的吸附量；S_{max} 为土壤对磷的最大吸附量；K 为吸附常数。

土壤侵蚀过程的相关模型

史培军，刘宝元，张科利等：土壤侵蚀过程与模型研究．资源科学，1999，21(5)

(1) 降雨侵蚀力 R 模型：

$$R = \sum EI_{30}$$

式中，E 为第一次降雨雨滴落地时的总能量；I_{30} 为该次降雨中最大 30min 降雨强度。

（2）风侵蚀力模型：

$$U=\left(\frac{V}{V_p}\right)^{\eta-1}\exp\left[(\eta-1)\left(1-\frac{V}{V_p}\right)\right]$$

$$\eta=\frac{\overline{V^2}}{S_{DV^2}}$$

式中，U 为无量纲变量，表示风速为 V 的发生频率；V_p 为频率最大时的风速；V 为年平均风速；S_{DV^2} 为风速的标准差。

（3）土壤水蚀过程模型：

$$Dd=\alpha(Tc-g)$$

$$D_i=r_ik_i\left[2.96(\sin\theta)^{0.79}+0.56\right]c_i$$

式中，Dd 为分散或沉积率；α 为表达一个已知沉积物粒所配的似然性系数；Tc 为搬运能力；g 为输沙量；D_i 为细沟间侵蚀率；r_i、k_i 分别为细沟间侵蚀力因子和土壤的可蚀性因子；θ 为坡面坡度；c_i 为细沟间坡面覆盖和经营管理因子。

（4）土壤侵蚀预报模型研究进展：

在 WEPS 中的土壤侵蚀方程：

$$\underline{E}=W\cdot S\cdot C$$

式中，$\underline{E}$ 为平均土壤流失量；W 为风力侵蚀力因子；S 为土壤可蚀性因子；C 为作物覆盖因子。

土壤盐渍化与地下水动态特征关系模型

杨建强，罗先香：土壤盐渍化与地下水动态特征关系研究．水土保持通报，1999，19(6)

（1）积盐量模型：

$$S=E\cdot M$$

式中，S 为单位面积下潜水蒸发所产生的积盐量；E 为潜水蒸发量；M 为潜水矿化度。

（2）土壤积盐速度 ΔS 模型：

$$\Delta S=\frac{10^{-4}S}{\gamma}$$

式中，S 为0~100cm深度内单位体积土壤中的积盐量；γ 为土壤容重。

（3）土壤含盐量 C_s 模型：

$$C_s=C_{s0}-\Delta S\cdot t$$

式中，C_{s0} 为土壤初始含盐量；ΔS 为土壤积盐速度。

（4）潜水蒸发量 E 模型：

$$E=\alpha\cdot P$$

式中，α 为潜水蒸发系数；P 为水面蒸发量。

沉排宽度模型

张庆彬，张升亮：铰链式模袋混凝土沉排技术在北杜控导工程中的应用．水土保持通报，2000，19(1)

$$B=B_0+\sqrt{1+m^2}\,(h_m-h_1)$$

式中，B 为护岸沉排宽度；B_0 为排体锚固宽度；m 为稳定坡度系数；h_m 为最大冲刷坑深度；h_1 为排体底部距造床流量相应水位深度。

半干旱地貌的植被-土壤耦合双向反射模型

Ni W，Li X：半干旱地貌的植被-土壤耦合双向反射模型．Remote Sensing of Environment, 2000, 74

土壤 BRDF 模型——Walthall 模型：

$$R_s(\theta_i,\theta_v,\varphi)=\frac{\rho_s(\theta_i,0,0)}{e_0(\theta_i)}\left[e_0(\theta_i)+A\right]$$

式中，$A=e_1(\theta_i)\theta_v\cos(\varphi)+e_2(\theta_i)\theta_v^2$；$e_0(\theta_i)=16.41-4.3\theta_i^2$；$e_1(\theta_i)=7.363\theta_i$；$e_2(\theta_i)=-4.3+7.702\theta_i^2$；$R(\theta_i,\theta_v,\varphi)$ 是双向反射率；θ_i 和 θ_v 分别是太阳顶角和视顶角；$\rho_s(\theta_i,0,0)$ 是当太阳顶角为 θ_i 时的底角反射率；φ 是相对方位角

土壤容许流失速率

陈奇伯，齐实，孙立达：土壤容许流失量研究的进展与趋势．水土保持通报，2000，20(1)

$$T=D\left[\frac{P}{(1-P)}\right]$$

式中，P 为成土转化速率；D 为淋溶速率。

半干旱地区土壤盐碱化预报模型

李凤全，卞建民，张殿发：半干旱地区土壤盐碱化预报研究——以吉林省西部洮儿河流域为例．水土保持通报，2000，20(2)

（1）流域地下水盐均衡方程：

$$\Delta W_1=10(Q_1C_1+Q_2C_2+Q_3C_3)-10(Q_4C_4+Q_5C_5+Q_6C_6)$$

式中，ΔW_1 为地下水中盐储存变化量；Q_1、C_1 为降水

补给地下水量及渗入水的矿化度；Q_2、C_2为地下径流流入量及地下水的矿化度；Q_3、C_3为河流补给地下水量及河水的矿化度；Q_4、C_4为地下水蒸发量及地下水的矿化度；Q_5、C_5为地下径流流出量及地下水的矿化度；Q_6、C_6为地下水现状开采量及地下水的矿化度。

(2) 包气带土壤盐碱化程度预测：

1) 潜水蒸发盐通量J_1及积盐率S_1模型：

$$J_1 = Q_1C_1 \times 10^{-2}$$
$$S_1 = \frac{J_1}{2000r}$$

2) 降水入渗补给地下水盐通量J_2及脱盐率S_2模型：

$$J_2 = Q_2C_2 \times 10^{-2}$$
$$S_2 = \frac{J_2}{2000r}$$

3) 土壤盐碱化程度预测模型：

$$S_t = S_0 \pm \Delta S \cdot t$$

式中，S_t为预测年的土壤含盐量；S_0为初始土壤含盐量；ΔS为积盐率与脱盐率之差；t为预测时间长度。

(3) 流域内土壤盐碱化预报：

土壤盐碱化预报系数C模型：

$$C = G_r \cdot S_r \cdot I_r \cdot E_r$$

式中，G_r为地下水埋深的影响率；S_r为地下水矿化度的影响率；I_r为地下水渗透速度的影响率；E_r为地下水蒸发强度的影响率。

残存森林的碳(CC_3)和来源于C_4植被中的碳(CC_4)的计算

Rhoades C C, Eckert G E, Coleman D C：厄瓜多尔低山区的森林、农业和次生植被之间土壤碳的差异. Ecological Applications, 2000, 10(2)

$$CC_3 = (\delta^{13}C_s - \delta^{13}CC_4)/(\delta^{13}CC_3 - \delta^{13}CC_4)$$

$$CC_4 = (\delta^{13}C_s - \delta^{13}CC_3)/(\delta^{13}CC_4 - \delta^{13}CC_3)$$

式中，$\delta^{13}C_s$是草场的样品土壤中^{13}C的常规同位素比率；$\delta^{13}CC_4$是指输入的C_4落叶层中^{13}C的常规同位素比率；$\delta^{13}CC_3$是指C_3的森林土壤中^{13}C的常规同位素比率。

地下碳循环过程中的碳同位素的比率

Ehleringer J R, Buchmann N, Flanagan L B：地下碳循环过程中的碳同位素的比率. Ecological Applications, 2000, 10(2)

常用的同位素比率δ(‰)可以表示为：

$$\delta = \left(\frac{R_{sample}}{R_{standard}} - 1\right) \times 1000$$

式中，$R = \frac{^{13}C}{^{12}C}$；土壤中$CO_2$的产出可认为是三个独立成分过程作用的结果，可表示为$F_{R\text{-soil}} = F_{root} + F_{SOM} + F_{litter}$，$CO_2$产出成分$F_{R\text{-soil}}$包括根的呼吸作用$F_{root}$、土壤有机质的氧化作用$F_{SOM}$和地表落叶层的还原作用$F_{litter}$。

土壤有机物的年龄与土壤呼吸的估算模型

Trumbore S：土壤有机物的年龄与土壤呼吸作用——放射性碳对地下碳过程的约束. Ecological Applications, 2000, 10(2)

(1) 放射性碳的数据用其与标准的同位素的偏差的千分率来表示：

$$\Delta^{14}C = [F - 1] \times 100$$

式中，$F = \frac{\left(\frac{^{14}C}{^{12}C}\right)_{\text{样本}}}{\left(\frac{^{14}C}{^{12}C}\right)_{\text{标准}}}$。

(2) 土壤呼吸作用中的放射性碳：

如果测量出了土壤全部呼吸作用中的放射性碳的含量，则土壤呼吸作用在周转期大于一年和小于一年的各组分之间的分割可从^{14}C质量平衡中估计出来：

$$\sum S_{OM_i} F_i + RF_{atm} = TF_T$$

式中，S_{OM_i}表示根据每个确定的土壤有机物成分(i)、用其^{14}C的签名变量F_i估计的CO_2通量；R表示根据根的呼吸作用和前一年碳的分解作用，用其^{14}C的签名变量F_{atm}估计的CO_2通量；T是用^{14}C的签名变量F_T估计的总的呼吸通量。

(3) 总的呼吸通量的计算公式：

$$\sum S_{OM_i} + R = T$$

式中，R与T的比率可根据各自的同位素签名而得到。

土壤侵蚀方程与降雨指标模型

李鸿春，崔伟宏：缅甸中部干旱地区土壤侵蚀的分析. 遥感学报, 2000, 4(3)

(1) 土壤侵蚀方程：

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

式中，A 为土壤流失量，单位为$T\cdot hm^{-2}$；R 为降雨因子，单位为$N\cdot hm^{-2}$；K 为土壤流失因素，单位为$kg\cdot hm^2\cdot N^{-1}\cdot m^{-2}$；$L$ 为波长；S 为坡度；C 为土地覆盖因子；P 为支持因子。

(2) 降雨指标模型：

$$R_{ann}=\left[4.17\times\sum_{i=1}^{12}\left(P_i^2/P\right)\right]-152$$

式中，P_i 表示第 i 个月的降雨量(mm)，P 表示全年的降雨量(mm)；R_{ann} 表示年平均的 R 因子。

元素在不同尺度的相关特征模型

徐尚平，陶澍，徐福留等：内蒙古土壤微量元素含量的空间结构特征。地理学报，2000，55(3)

$$C_{ij}=a_{ij}\sqrt{\lambda_j/\sigma_i^2}$$

式中，C_{ij} 是第 j 个特征向量的第 i 个元素；λ_j 为第 j 个特征值；σ_i^2 为第 i 个原始变量的方差。

土壤有机质与土壤养分平衡分析模型

庄恒扬，曹卫星，沈新平：麦-稻两熟集约生产土壤养分平衡与调控研究。生态学报，2000，20(5)

(1) 土壤有机质平衡模型：

土壤有机质平衡=
有机物年归还量× 腐殖化系数−
耕层土壤有机质量× 有机质年矿化率

(2) 土壤有机质动态模型：

$$OM_t=C_0e^{-kt}+X_t$$

$$X_t=\frac{\varphi-\varphi^{t+1}}{1-\varphi}\cdot X_0$$

$$\varphi=e^{-k}$$

$$X_0=\frac{RU}{W}$$

式中，t 为时间；OM_t 为第 t 年后的土壤有机质含量；C_0 为开始时土壤有机质含量；k 为土壤有机质矿化率；X_t 为 t 年内由于人工归还有机物形成的土壤有机质含量；R 为每年有机物归还量；U 为有机物腐殖化系数；W 为土重。

概率生成函数

王训明，董治宝，武生智等：土壤风蚀过程的一类随机模型。水土保持通报，2001，21(1)

$$G_x(t,z_1,\cdots,z_k)=\prod_{i=1}^{k}\left[1+\xi_i(t)(z_i-1)\right]^{m_i}\times\exp\left[\sum_{i=1}^{k}\xi_i(t)\varphi_i(t)(z_i-1)\right]$$

式中，k 为由不同风蚀因子而引起的风蚀面上的 m 质量单元数量的可蚀土壤颗粒种类；$x_i(t)$ 表示 t 时刻风蚀面上的 S_i 类颗粒的数量，$i=1,2,\cdots,k$；t 为某一研究时刻；Z_k 为参数变量；$\xi_i(t)=\exp\left(-\int_0^t a_i\mathrm{d}S\right)$，$a_i(t)$ 为风蚀率；$\varphi_i(t)=\int_0^t\lambda_i\xi^{-1}(s)\mathrm{d}s$，$\lambda_i(t)$ 为某风蚀率，为 $a_i(t)$ 的风蚀面内的物质迁入率。

土壤侵蚀综合指数

杨存建，张增祥，韩秀珍等：不同植被指数情况下的中国土壤侵蚀特征分析。水土保持通报，2001，21(1)

$$I_D=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}A_{ij}$$

式中，W_{ij} 为第 i 类第 j 级的土壤侵蚀强度的分级值；A_{ij} 为第 i 类第 j 级的土壤侵蚀强度的面积比重。

沟谷侵蚀—堆积模式

邓成龙等：末次间冰期以来黄河中游黄土高原地区的沟谷侵蚀—堆积模式。地理学报，2001，56(1)

(1) 第一侵蚀期(S_{ER_1})和第二侵蚀期(S_{ER_2})沟谷的横截面积可用下式计算：

$$S_{ER_1}=2\int_0^{400}\left[A_1A_2(x)-ER_1(x)\right]\mathrm{d}x \tag{1}$$

$$S_{ER_2}=2\int_0^{150}\left[C_1C_2(x)-ER_2(x)\right]\mathrm{d}x \tag{2}$$

同理，第一堆积期(S_{AC1})和第二堆积期(S_{AC2})沉积物的横截面积可用下式计算：

$$S_{AC_1}=2\int_0^{300.8}\left[AC(x)-ER_1(x)\right]\mathrm{d}x \tag{3}$$

$$S_{AC_2}=2\int_0^{20}\left[EF(x)-ER_2(x)\right]\mathrm{d}x \tag{4}$$

得出各个侵蚀期或堆积期剖面的横截面积：

$$S_{ER_1}=2\int_0^{400}(95-1.3019\times10^{-10}x^{4.5722})\mathrm{d}x=61240.41\mathrm{m}^2 \tag{5}$$

$$S_{ER_2}=2\int_0^{150}(65-2.5732x^{0.0185})\,dx = 18668.36\,m^2 \tag{6}$$

$$S_{AC_1}=2\int_0^{3008}(2.9928e^{0.0073x}-1.3019\times10^{-10}x^{4.5722})\,dx = 3536.06\,m^2 \tag{7}$$

$$S_{AC_2}=2\int_0^{20}(4.5-2.5732x^{0.0185})\,dx = 73.18\,m^2 \tag{8}$$

(2) 不同时期的侵蚀模数或堆积速率计算：

一定时期内的侵蚀模数(M_{ER})或堆积速率(R_{AC})可用下式计算：

$$M_{ER}=\frac{\Delta V_{ER}\cdot\rho}{\Delta S_{ER}\cdot\Delta t_{ER}}$$

或

$$R_{AC}=\frac{\Delta V_{AC}\cdot\rho}{\Delta S_{AC}\cdot\Delta t_{AC}} \tag{9}$$

式中：M_{ER} 和 R_{AC} 的单位为 $kg\cdot m^{-2}\cdot ka^{-1}$ 或 $t\cdot m^{-2}\cdot ka^{-1}$；$\Delta V_{ER}$ 或 ΔV_{AC} 为一定侵蚀期或堆积期内被侵蚀或堆积的沉积物的体积(m^3)；ΔS_{ER} 为一定侵蚀期的流域面积(m^2)；ΔS_{AC} 为一定堆积期的沉积物在水平面上的投影面积(m^2)；Δt_{ER} 或 Δt_{AC} 为一定侵蚀期或堆积期的持续时间(ka)；ρ 为黄土密度，$\rho=1500kg\cdot m^{-3}$。

泥石流的流速方程

马蔼乃：思维科学与地理思维研究. 地理学报, 2001, 56(2)

$$v=k\left(\frac{C}{\rho_c}\right)^m\left(\frac{d}{h}\right)^n\sqrt{ghi}$$

式中，$v/(gh)^{1/2}$，C/ρ_c，d/h，i 都是无量纲数。$v/(gh)^{1/2}$ 实际上是弗录德数(Fr)，即动能与位能的比值；C/ρ_c 为相对密度；d/h 为相对糙率；i 为坡度，本身是无量纲数。根据经验写成非线性分形指数函数关系，式中 $v/(gh)^{1/2}$ 为摩阻速度；k 为地理系数；m,n 为地理指数。

以 ^{210}Pb 核心为基础的一个经验模型

Wieder R K：泥炭地中碳平衡的过去、现在和未来：以 ^{210}Pb 核心为基础的一个经验模型. Ecological Applications, 2001, 11(2)

(1) 对最上层 2cm 泥炭而言：

$$M_{0\sim2}=(P_{np}Y_{r0\sim2})\times\exp(-k_{0\sim2}Y_{r0\sim2})$$

式中，$M_{0\sim2}$ 是指最上层 2cm 泥炭中有机质的质量，$Y_{r0\sim2}$ 是指最上层 2cm 泥炭的年龄，它由 ^{210}Pb 的数据决定。P_{np} 是指每年在泥炭表面上的有机质净初级生产量，$k_{0\sim2}$ 是指泥炭最上层的指数衰减系数(每年)。

(2) 在 2~4cm 处：

$$M_{2\sim4}=(P_{np}Y_{r2\sim4})\times\exp(-k_{0\sim2}Y_{r0\sim2})\times\exp(-k_{2\sim4}Y_{r2\sim4})$$

在 $1m^2$ 的泥炭地下深度 x 和 y 之间的有机质量可用下式表示：

$$M_{x\sim y}=(P_{np}Y_{rx\sim y})\times\exp[-(k_{0\sim2}Y_{r0\sim2}+k_{2\sim4}Y_{r2\sim4}+\cdots+k_{x\sim y}Y_{rx\sim y})]$$

$$M_{x\sim y,t+1}=\{M_{x\sim y,t}+P_{np}\times\exp[-(k_{0\sim2}Y_{r0\sim2}+\cdots+k_{(x-2)-(y-2)}Y_{r(x-2)-(y-2)})]-P_{np}\exp[-(k_{0\sim2}Y_{r0\sim2}+\cdots+k_{x\sim y}Y_{rx\sim y})]\}\times\exp(-k_{x\sim y}Y_r)$$

由于还原作用每一部分中有机质的损失量为：

$$L_{oss\,x\sim y}=\{M_{x\sim y}-(P_{np}\times\exp[-(k_{0\sim2}Y_{r0\sim2}+\cdots+k_{(x-2)-(y-2)}Y_{r(x-2)-(y-2)})]-P_{np}\exp[-(k_{0\sim2}Y_{r0\sim2}+\cdots+k_{x\sim y}Y_{rx\sim y})]\times\exp(-k_{x\sim y}Y_r)\times[1-\exp(-k_{x\sim y}Y_r)]$$

一年中有机质从可测定年龄的最深 2cm 直接传到某一部分的有机质可用下式表示：

$$D_{eepurars_{x\sim y\,to\,y\sim z}}=P_{np}\times\exp[-(k_{0\sim2}Y_{r0\sim2}+k_{2\sim4}Y_{r2\sim4}+\cdots+k_{x\sim y}Y_{rx\sim y})]$$

上式表示一年中通过中心到达可测定年龄的最深部分的 P_{np}。

(3) 用 P_{np} 和 k 的调节值建立联立方程，未来的有机质为：

$$M_{x\sim y,t+1}=M_{x\sim y,t}+P_{np}\left(1\pm\frac{X_x\times0.1}{100}\right)\times$$

$$\exp\left\{-\left[k_{0-2}Y_{r0-2}\left(1\pm\frac{X_x\times0.1}{100}\right)+\cdots+\right.\right.$$

$$k_{(x-2)-(y-2)}Y_{r(x-2)-(y-2)}\times$$

$$\left.\left.\left(1\pm\frac{X_x\times0.1}{100}\right)\right]\right\}-P_{np}\left(1\pm\frac{X_y\times0.1}{100}\right)\times$$

$$\exp\left\{-\left[k_{0-2}Y_{r0-2}\left(1\pm\frac{X_y\times0.1}{100}\right)+\cdots+\right.\right.$$

$$\left.\left.k_{x-y}Y_{rx-y}\left(1\pm\frac{X_x\times0.1}{100}\right)\right]\right\}\times$$

$$\exp(-k_{x-y}Y_r)$$

$$X_y=I-\mathrm{INT}(A_y)$$

式中，I 是下标变量，用来将模拟迭代地每次向前移动一年，INT 是一个函数，用来返回 A_y 中的一个最大整数值，A_y 代表碳心中第 y 个 2cm 截面底部的年龄，符号"±"表示 P_{np} 或 k 的值是减少了还是增加了。

(4) 在北方浅层泥炭地中未来的碳平衡：

$$M_a=\frac{p_a}{\alpha_a}[1-e^{-(\alpha_a t)}]$$

式中，M_a 是指上层泥炭中的有机质含量，p_a 是指 P_{np}，α_a 是指上层泥炭中的还原作用速率，t 是指时间。

黄土滑坡群的系统分析模型

王家鼎，惠洪河：黑方台台塬灌溉水诱发黄土滑坡群的系统分析 水土保持通报，2001，21(3)

(1) 土体的有效渗透系数 K 与深度的关系模型：

$$H=19.95-2.63K$$

$$K=\sqrt{K_v^2+K_h^2}$$

式中，H 为土体埋深；K_v,K_h 分别为黄土的垂直渗透系数和水平渗透系数。

(2) 能量守恒关系模型：

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}y}\sqrt{(1+y)^2}=\sqrt{2g[(1-A_DB_D\cdot\mu)y-(1-B_D)\cdot\mu x]}$$

式中，A_D、B_D 为剪切状态下的孔压参数；μ 为摩擦系数。

Kriging 和 Cokriging 估值模型

马孝义，李新平，赵延风：土壤含水量的 Kriging 和 Cokriging 估值研究 水土保持通报，2001，21(3)

(1) Cokriging 方程组：

$$\begin{cases}\sum_{i=1}^{n_1}\lambda_{1i}\gamma_{11}(x_{1i},x_{1k})+\sum_{j=1}^{n_2}\lambda_{2j}\gamma_{12}(x_{1k},x_{2j})+\\ \quad\mu_1=\gamma_{12}(x_{1k},x_0)\quad(k=1,2,\cdots,n_1)\\ \sum_{i=1}^{n_1}\lambda_{1i}\gamma_{21}(x_{1i},x_{1l})+\sum_{j=1}^{n_2}\lambda_{2j}\gamma_{22}(x_{1l},x_{2j})+\\ \quad\mu_2=\gamma_{22}(x_{1l},x_0)\quad(l=1,2,\cdots,n_2)\\ \sum_{i=1}^{n_1}\lambda_{1i}=0\\ \sum_{j=1}^{n_2}\lambda_{2j}=0\end{cases}$$

(2) 估值模型：

$$\hat{Z}_2(x_0)=\sum_{i=1}^{n_1}\lambda_{1i}Z_1(x_i)+\sum_{j=1}^{n_2}\lambda_{2j}Z_2(x_j)$$

式中，由 Cokriging 方程组求出 λ_{1i}和λ_{2j}，即可得出估值 $\hat{Z}_2(x_0)$。

滑坡高速滑动过程中滑动面温度 θ 的变化规律模型

郝爱国，胡厚田，姚令侃：大型高速岩质滑坡启程活动阶段孔隙流体压力效应 水土保持通报，2001，21(3)

$$\Delta\theta=\frac{q_0\cdot H}{k}\cdot\left[1-\frac{8}{\pi^2}\cdot\exp\left(-\frac{\pi^2\cdot\alpha}{4H^2}\cdot t\right)\right]$$

$$q_0=\frac{1}{2}q$$

式中，H 为滑体的厚度；k 为滑体的热传导系数；q 为热流密度。

土壤退化指数

郭旭东等：低山丘陵区土地利用方式对土壤质量的影响——以河北省遵化市为例 地理学报，2001，56(4)

$$I_d=\frac{1}{n}\left(\frac{P_1-P_1'}{P_1'}-\frac{P_2-P_2'}{P_2'}+\cdots+\frac{P_n-P_n'}{P_n'}\right)\times100\%$$

式中，I_d 为土壤退化指数，$P_1',P_2',\cdots,P_n'$ 为基准土地利用类型下土壤属性 1，属性 2，到属性 n 的值，$P_1,P_2,\cdots,P_n$ 为其他土地利用类型下土壤各属性值；n 为选择的土壤属性数。土壤退化指数可以是正数也

可以是负数，负数表明土壤退化，正数说明土壤质量有所提高。

风化强度计算公式

张丽萍等：长江三峡坝区花岗岩风化壳化学元素迁移特征. 地理学报，2001，56(5)

$$I=\left(1-\frac{E_r\times\bar{C}+E_m}{2}\right)\times100\%$$

式中，I 为新鲜基岩体的均衡度，包括氧化物元素迁移率的均衡度和风化率的均衡度，将风化壳各层的均衡度与其对比。母岩经过风化后，其均衡度一定小于 I，取%为其值；$E_r=\frac{E^{H(s)}}{N}$，为风化率均衡度，$H(s)=-\sum_{i=1}^{N}P_i\cdot\ln P_i$ 为信息熵函数，N 为数值的个数，P_i 为概率，即每个风化率值占总数值的%；E_m 为元素迁移率均衡度，求取方式相同；$\bar{C}$ 为平均淋溶系数，且 $C=\frac{Y_0-Y_i\times\frac{\text{新鲜基岩的}Al_2O_3\text{含量}}{\text{各层的}Al_2O_3\text{含量}}}{Y_0}\times100\%$，淋溶系数 C 为氧化物在风化过程中从母岩中迁移的重量(%)，Y_0 为新鲜基岩该氧化物的重量(%)、Y_i 为各层该氧化物的重量%，当所计算的 C 值<0 时，则忽略不参加计算。

旋转主成分分析

王澄海等：青藏高原季节性冻土年际变化的异常特征. 地理学报，2001，56(5)

任一标准化资料阵 ${}_mZ_n$（简记为 Z）

$${}_mZ_n={}_mV_{k\,k}T_n\qquad(k<m)\qquad(1)$$

式中，${}_mV_k$ 为 $m\times k$ 维空间特征向量阵(简记为 V)，${}_kT_n$ 为 $k\times n$ 维时间系数阵(简记为 T)。对(1)式做正交变换：

$${}_mZ_n={}_mL_k\bullet{}_kF_n\qquad(2)$$

式中，L 为空间特征向量，称为空间载荷向量(loading vector, LV)，由于 Z 已经标准化，显然，L 与 V 在空间分布上完全一致，但在数值上元素 L_{jk} 是第 k 个主要分量与第 j 个站冻土深度序列的相关系数。同样，F 与 T 具有相同的特征，称为主分量或主成分(principle component, PC)。

为了更加突出 LV 的区域特征，按照 Horle、Ngarcheung Lau 的方法，这里在 EOF 分析的基础、对得到的特征向量进行正交旋转。即对于任意 2 个因子，其载荷阵和正交变换阵分别为：

$$L=\begin{bmatrix}l_{11}&l_{12}\\l_{21}&l_{22}\\\vdots&\vdots\\l_{n1}&l_{n2}\end{bmatrix},\quad \Gamma=\begin{bmatrix}\cos\varphi&-\sin\varphi\\\sin\varphi&\cos\varphi\end{bmatrix}\qquad(3)$$

$$C=\begin{bmatrix}l_{11}&l_{12}\\l_{21}&l_{22}\\\vdots&\vdots\\l_{n1}&l_{n2}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\cos\varphi&-\sin\varphi\\\sin\varphi&\cos\varphi\end{bmatrix}\qquad(4)$$

式中，逐次对每 2 个因子的荷载向量作上述旋转。一般地，对 n 个因子在旋转时，共需进行 $\frac{n}{2}(n-1)$ 次变换，旋转完毕后，使每次旋转后的总方差 $G=V_1+V_2+\cdots+V_n\to\max$，显然，第 i 次旋转有 $G(i)$，则第 $i+1$ 次旋转就有 $G(i+1)$，当 $G(i)$ 上升到某个 $G(i+1)$ 时，总方差改变不大即可停止旋转。因此在实际计算中，可拟定临界值 $|G(i+1)-G(i)|<\alpha$ 作为因子载荷阵调整的终止。旋转后的 LV 和 PC 相应地变为 RLV(rotated loading vector, RLV)和 RPC(rotated principle component, RPC)，称之为旋转荷载向量和旋转主成分。LV 反映了与分析资料场尺度相当的主要异常特征，RLV 反映了分析资料场主要的局布特征。本工作中在 EOF 分析的基础上，取前 10 个主分量进行旋转。二阶主值趋势函数 $Y_t=a_0+a_1t+a_2t^2+\cdots$，$a_0,a_1,a_2$ 为待定系数，有最小二乘法确定。

土壤微生物生物量磷的测定模型

林启美：土壤可溶性无机磷对微生物生物量磷测定的干扰. 生态学报，2001，21(6)

微生物生物量磷 B_p 模型：

$$B_p=\frac{F-UF}{K_p\cdot R}$$

式中，F 为熏蒸土壤 $NaHCO_3$ 所浸提的磷量；UF 为不熏蒸土壤 $NaHCO_3$ 所浸提的磷量；K_p 为 $NaHCO_3$ 所浸提的微生物生物量磷占总微生物生物量磷的比例；R 为加入的无机磷的回收率。

植被覆盖率与风蚀输沙率定量关系模型

黄富祥等：毛乌素沙地植被覆盖率与风蚀输沙率定量关系. 地理学报，2001，56(6)

(1) 风蚀输沙率模型：

$$q=B(u-u_*)^3$$

式中，q 为风蚀输沙率，表示在某一风速下单位时间内通过单位过沙宽度的风蚀输沙数量，单位一般为 $g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1}$，或 $t \cdot km^{-1} \cdot a^{-1}$ 等，这里风蚀输沙率单位为 $g \cdot cm^{-1} \cdot min^{-1}$； u_* 表示高度 z 的沙粒起动风速，u 为高度 z 的实际风速值。

(2) 实验常数 B 的计算公式为：

$$B = aC\sqrt{\frac{d}{D}}\frac{\rho}{g}$$

式中，C 为沙粒分选系数；a 由 $[0.174/\lg(z/z_0)]^3$ 计算得到；z 表示测定沙粒起动风速的高度，z_0 表示地面粗糙度；D 为标准沙粒粒径；ρ 为空气密度；g 为引力常数。

(3) Wasson&Nanninga 风蚀输沙率模型 I：

$$q = B[uf(c) - u_*]^3$$

式中，$f(c)$ 为一单调递减函数，刻画植被覆盖率对风速的影响；c 为植被覆盖率；其他各项意义同前。函数 $f(c)$ 具有如下形式：

$$f(c) = e^{-k_1 c - k_2 c^2}$$

式中，k_1，k_2 为 2 正值常数

(4) 风蚀输沙率模型 II：

$$q = B[u - u_* g(c)]^3$$

如果采用函数 $g(c)$ 刻画植被覆盖率对沙粒起动风速的提高，则函数 $g(c)$ 具有如下形式：

$$g(c) = e^{k_3 c - k_4 c^2}$$

式中，k_3，k_4 为 2 个正的常数。函数 $g(c)$ 满足两个基本条件：①取值为大于或等于 1 的正数、单调递增，表示沙粒起动风速随着植被覆盖率的增大而增大的实际状况；②满足 $g(0)=1$ 边界条件，表示当没有植被覆盖存在时，沙粒起动风速不会发生改变。

第十章 水 文

海水运动实验公式

吕炯：海水之运行 地理学报 1935，2(1)

$$\xi_2 = -\frac{\rho_1}{\rho_2 - \rho_1}\xi_1$$

式中，ξ_1 为上层水面高出原来水面之距离；ξ_2 为下面水层低于原来水面之距离；ρ_1 为上面水层运动之速率；ρ_2 为下面水层运动之速度。

海水运行公式

吕炯：渤海盐分之分布与其海水之运行．地理学报，1936，3(2)

(1) 垂直的运行：设液体在静止时，则影响该液体的力只有重力及压力，其内部平衡方程为：

$$g - \frac{1}{P}\frac{\partial \rho}{\partial z} = 0$$

式中，g 为地心引力；ρ 为海水密度；P 为压力；z 为深度

设等容度面与等压面不相平行，互成交叉，而令 N_1 垂直于等压面，N_2 垂直于等容度面。根据定义，压力坡度为 $G = -\frac{dp}{dn_1}$，流动向量为 $B = \frac{du}{dn_2}$。

假定有二等压面及二等容度面，等压面上之压力各为 p 及 $p+\Delta p$，等容度面上之容度为 a 及 Δa，此二等压面与二等容度面相交形成一四边形，近似于一平行四边形。压力坡度 G 在一等容度面上产生一加速度 $G(a+\Delta a)$，而在其他一等容度面上为 Ga。此两加速度之方向皆与平行四边形之底边 $\frac{\Delta n_2}{\sin\theta}$ 成直角，故此平行四边形之角加速度为：

$$\frac{(a+\Delta Ga)G - aG}{\frac{\Delta n_2}{\sin\theta}} = \Delta a\frac{G}{\frac{\Delta n_2}{\sin\theta}} =$$

$$B\Delta n_2\frac{G}{\frac{\Delta n_2}{\sin\theta}} = BG\sin\theta = A$$

式中，A 为角加速度。

(2) 平面的运行：若 n 代表界面上之法线，u, v, w 代表下部密度较大水量在 x, y, z 坐标上之三种速度分力，u'、v'、w' 代表上部水体之分力，则运动的界面条件为：

$$(u-u')\cos(nx) + (v-v')\cos(ny) - (w-w')\cos(nz) = 0$$

其力学的条件则在不连续面上两方压力相等，即 $p - p' = 0$。

潮力公式

吕炯：潮汐．地理学报，1936，3(2)

(1) 月球之潮力为：

$$F = KmM\frac{2R}{r^3}$$

式中，M 为月球之质量；R 为地球半径；m 为一质点质量；K 为引力常数；r 为地球与月球间之距离。

(2) 太阳之潮力为：

$$F = KmS\frac{2R}{s^3}$$

式中，S 为太阳之质量；s 为地球太阳间之距离；其他变量和参数含义同上。

海流分析公式

唐世凤：渤海湾及山东沿岸的海流 地理学报，1953，19(1)

(1) 常流流速：

$$H = \sqrt{C_N^2 + C_E^2}$$

式中，H 为常流的流速；C_N 为北流的 12 个代表值平均；C_E 为东流的 12 个代表值平均。

常流流向：

$$\tan\theta = \frac{C_N}{C_E}$$

式中，$90° - \theta$（$\theta < 90°$）或 $450° - \theta$（$\theta > 90°$）为自北起算向东顺时针旋转的方向。

(2) 半日周期潮流最大流速：

$$U = \sqrt{\frac{1}{2}(H_N^2 + H_E^2 + K)}$$

$$K=\left\{\left[H_N^2\cos(2g_N)-H_E^2\cos(2g_E)\right]^2+\left[H_N^2\sin(2g_N)+H_E^2\sin(2g_E)\right]^2\right\}^{\frac{1}{2}}$$

式中，H_N 为每站北流流速；H_E 为每站东流流速；g_N 为每站北流摩角；g_E 为每站东流摩角。

最小流速 V：

$$V=\sqrt{\frac{1}{2}(H_N^2+H_E^2-K)}$$

最大流速的摩时：

$$\tan\theta=\frac{H_N^2\sin(2g_N)+H_E^2\sin(2g_E)}{H_N^2\cos(2g_N)+H_E^2\cos(2g_E)}$$

最大流速的方向 D：

$$\tan\alpha=\frac{H_N\cos\left(\frac{1}{2}\theta-g_N\right)}{H_E\cos\left(\frac{1}{2}\theta-g_E\right)}$$

式中，$D=90°-\alpha$（$\alpha<90°$）或 $D=450°-\alpha$（$\alpha>90°$）为以正北为0°起算的自北向东顺时针的方向度数。

河流稳定性指标（表1）

钱宁：冲积河流稳定性指标的商榷．地理学报，1958，24(2)

表1　冲积河流稳定性指标公式及其物理意义

作者	稳定性指标	物理意义
洛赫钦	$K=D/\Delta h$ 式中，D 为床沙的平均直径；Δh 为每公里内水位的降落	泥沙对于水流的抵抗力与水流的拖曳力的比值
维立卡诺夫	$K=D/S$ 式中，S 为坡降	河流所具有的泥沙的可动性与使河流处于动力平衡所需要的坡度的比值
马卡维也夫	$K=\frac{D}{hS}$ 式中，h 为水深	水流的深度也影响泥沙的输移，在洛赫钦的处理中，应取 $V^2\sim hS$
伏咯蒂	$K=\frac{D}{RS}$ 式中，R 为水力半径	泥沙的起动流速与 $\sqrt{D}$ 成正比，而对于稳定的河渠说，真正的平均流速应与起动流速成比例。平均流速则取 $V^2\sim hS$
维立卡诺夫	$K=gD/V^2$ 式中，g 为重力加速度	考虑水流的拖曳力时，直接引用水流的速度。引入 g 的目的在于使指标不带量纲，这样的稳定性指标具有福氏数的形式
奥尔洛夫	$K=\frac{\gamma_s-\gamma_f}{\gamma_f}\frac{D}{hs}$ γ_s 和 γ_f 分别为泥沙及水的单位容量	泥沙对于水流的抵抗力[$\sim(\gamma_s-\gamma_f)D^3$]与水流的拖曳力($\sim\gamma f hS$)的比值
窦国仁	$K=\frac{D}{V_0^2}+0.107h$ 式中 V_0 为河底流速(以 $m\cdot s^{-1}$ 计)，h 以 m 计，D 以 mm 计	从泥沙起动条件出发，考虑了水深对于起动流速的影响
雷布金	$K=\frac{V_s}{\sqrt{ghS}}$ 式中 V_s 为泥沙的沉速	悬沙分布公式中的指数

草原和森林草原区域河流径流状况分析公式

李伏维奇：论苏联欧洲部分草原和森林草原区域河流径流状况的改造．地理学报，1953，19(1)

(1) 森林草原截阻水分能力近似公式：

$$\lg Z=3.7\left(1-\frac{\sqrt{i}}{B}\right)$$

式中，Z 为成年森林带土壤所截阻的水量($m^3\cdot hm^{-2}$)；i 为森林带范围内的坡度；B 为森林带的宽度(m)。

(2) 因改造自然计划的实现而改变地表径流量的计算公式：

$$S'=\frac{F_HS+F_TS_T-f_B(Z-S)}{F}-V+\Delta S_i$$

式中，S' 为可望得到的年平均地表径流量；S 为现在的地表径流量(多年的观测平均)；S_T 为精密实行了草谷轮种农业制后可望得到的田地地表径流量；Z 为被森林截阻的水量；V 为流入水池的水量；ΔS_i 为因可

望增加的降水量而产生的地表径流增加量；F 为流域面积；F_H 为未耕地面积；F_T 为耕地面积；f_B 为受到森林带调节水分作用影响的土地面积(所有的径流量均以 mm 为单位，面积以 km^2 为单位)。

(3) 地下水对河流的可望供应量计算公式：

$$U' = U + K_u \Delta W$$

式中，U 为现在地下水对河流的供应量(多年平均)；ΔW 为土壤总水分的增加量($\Delta W = \Delta S + \Delta P$，其中 ΔS 为地表径流减少量，ΔP 为降水增加量)；K_u 为地下供应总系数($K_u = \frac{U}{W}$，其中 W 为现在土壤总水分)。

内陆河流水文特性分析公式

刘昌明，张云枢：甘肃内陆河流水文特性的初步分析. 地理学报, 1959, 25(1)

(1) 径流的冰雪补给公式：

$$Q_{\text{П}} = \frac{t^{6.45}}{4.683 \times 10^7}$$

式中，$Q_{\text{П}}$ 为洪水河山区流域日平均地表冰雪补给流量；t 为洪水河新地坝的日平均气温。

(2) 黄羊河流域年平均降水与年径流的相关回归方程：

$$y = 0.36x + 17.2$$

式中，x 为黄羊河流平均降水量；y 为黄羊河水峡口年平均流量。

(3) 本区河流各种频率(1%，5%，10%，50%)最大流量与流域面积的经验公式：

$$Q_{max_1} = 6.170F^{0.58}$$
$$Q_{max_5} = 4.680F^{0.55}$$
$$Q_{max_{10}} = 3.720F^{0.57}$$
$$Q_{max_{50}} = 1.260F^{0.57}$$

式中，Q_{max} 为最大流量；F 为流域面积。

游荡指标

钱宁：黄河下游游荡性河道的特性及其成因分析. 地理学报, 1961, 27(1)

$$\theta = \frac{\Delta Q}{0.5TQ_n}\left(\frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max} + Q_{min}}\right)^{0.6} \times \left(\frac{hJ}{D_{35}}\right)^{0.6}\left(\frac{B}{b}\right)^{0.45}\left(\frac{b}{h}\right)^{0.3}$$

式中，θ 为游荡指标(d^{-1})；ΔQ 为洪峰过程中流量上涨幅度($s \cdot m^3$)；T 为洪峰历时(d)；Q_n 为平滩流量($s \cdot m^3$)；Q_{max} 和 Q_{min} 分别为汛期最大和最小日平均流量($s \cdot m^3$)；h 和 b 分别为平滩流量下的平均水深和水面宽(m)；J 为坡降；D_{35} 为河床质组成中以重量计35%均较之为细的粒径(m)；B 为稀有洪水的过水宽度(m)。

土壤-植物-大气层系统中水分的传输模型

Cowan I R：土壤-植物-大气层系统中水分的传输. Journal of Applied Ecology, 1966, 2(1)

(1) 土壤水分特性：

$$\tau = \tau_0 \exp a(\theta_0 - \theta)$$

$$D = D_0 \exp b(\theta - \theta_0)$$

式中，D 是扩散率；τ 土壤水的许可潜力；τ_0，D_0，a 和 b 是特定土壤的常数；θ 是土壤水的体积密度。

$$\zeta = D/25.7 = -25.7/\tau = (25.7K)^{\frac{1}{2}}$$

式中，ζ 是水潜力函数；K 是土壤水传导率。

(2) 气候环境对蒸腾作用的影响：

每单位面积农作物的蒸腾作用率(E)：

$$E = \frac{D_v(c_0 - c)}{\rho(L_a + L_s)}$$

式中，D_v 是大气中水蒸气分子扩散系数；ρ 是液态水的密度；L_s 和 L_a 是水蒸气通过气孔离开农作物传输路径的有效长度；c_0 和 c 分别是在蒸发表面和在农作物以上任意高度的水蒸气浓度。

(3) 将紊流传输和能量平衡结合起来可发现：

$$E = \frac{\Delta(H - S)/\rho\lambda + \gamma D_v \delta / \rho L_a}{\Delta + (L_s + L_a)/L_a}$$

式中，Δ 是饱和水蒸气浓度的斜率：室温下水分的温度曲线；H 是净辐射的垂直流量；S 是到达地面的热流量；λ 是液态水的水蒸气潜热；γ 是一个干湿度常数；δ 是大气层中水蒸气浓度差额。

(4) 农作物因子的影响：

我们可以通过下式把农作物每单位面积的蒸腾作用率和通过植物的液态水流动关联起来：

$$E = \frac{\tau_r - \psi}{Z}$$

式中，ψ 是农作物叶片中的水潜能；Z 是农作物单位面积上对水分传输的内部阻力；τ_r 是在根表面上

土壤水潜能

$$E_w = \frac{\tau_r - \psi_w}{Z}$$

式中，E_w是在叶片水分潜能的临界条件下，土壤-植被系统将水分供应到叶片的能力的一个量度；ψ_w是ψ的临界潜能。

水量的供需平衡方程

陈传友：羊卓雍湖水资源供需平衡计算方法的探讨。自然资源，1977，2

$$T_iW_i = \Delta V_i + T_i\left(I_iA_i + \frac{I_i\Delta A_i}{2}\right)$$

式中，T_iW_i为时段总用水量；T_i为时段；ΔV_i为水面由I-1~I-I_i下降到I-I时，所消退的湖泊容积；I_i为时段内水面蒸发与路面蒸发量之差；A_i为时段内水面面积；ΔA为水段内水面面积缩小量。

黄土高原森林对年径流影响分析公式

刘昌明等：黄土高原森林对年径流影响的初步分析。地理学报，1978，33(2)

(1) 森林对年径流影响计算公式：

$$y = c_1 - c_2a - c_3a^2$$

式中，y为河流年径流量；a为流域林率[a=0(无林)和a=1(全为森林覆盖)]；c_1，c_2和c_3为方程参数(系数)。

(2) 林区林率与年径流量、地表洪水径流、地下径流的平衡方程式：

$$\frac{dy}{da} = \frac{dR}{da} + \frac{dy_n}{da}$$

式中，a为林率；y为年径流量；R为地表径流量；y_n为地下径流量。

整个冰川的物质平衡方程

中国科学院兰州冰川冻土研究所祁连山冰雪利用研究队：祁连山冰川的近期变化。地理学报，1980，35(1)

$$B = C + A = \sum_{i=1}^{n} C_iS_{ci} + \sum_{i=1}^{p} a_i + S_{ai}$$

式中，C,C_i和S_{ci}分别为整个冰川的总纯积累量、单点平均纯积累量(+)和两等值线间的积累区面积；A.a_i和S_{ai}分别为整个冰川的总纯消融量(−)、单点平均纯消融量(−)和两等值线间的消融区面积。

河系结构分析公式

陈永宗：大兴安岭地区河系结构的基本规律。地理学报，1980，35(4)

(1) 河道数量与级别的关系：

$$N_u = R_b^{s-u}$$

式中，N_u为u级河道的数量；R_b为分汊比率；S为流域内最高的河流级别。

(2) 河道级别与河道数量的相关系数：

$$\overline{L_u} = \overline{L_1}R_L^{u-1}$$

式中，$\overline{L_u}$为u级河道平均长度；$\overline{L_1}$为第一级河道平均长度；R_L为河长比率。

(3) 流域面积与级别的关系：

$$\overline{A_u} = \overline{A_1}R_a^{u-1}$$

式中，$\overline{A_u}$为u级河道的平均面积；$\overline{A_1}$为第一级河道的平均面积；R_a为面积比率

黄河下游挟沙能力自动调整机制分析公式

钱宁，张仁，李九发等：黄河下游挟沙能力自动调整机制的初步探讨。地理学报，1981，36(2)

(1) 实测流量-床沙质输沙率关系式：

对少沙河流：$Q_s = KQ^{\alpha}$

对多沙河流：$Q_s = KQ^{\alpha}S_{\pm}^{\beta}$

式中，Q_s为床沙质输沙率；Q为流量；$S_{\pm}$为上站来水中的全沙含沙量；K和α为待定常数。

(2) 爱因斯坦沙波阻力关系：

$$\frac{U}{U_*''} = f(\psi')$$

式中，U为平均流速；U_*''为与沙波阻力有关的摩阻流速；ψ'为与沙粒阻力有关的水流参数。

(3) 挟沙力关系：

$$\xi = f(D/X, E)$$

式中，ξ为包括床面小颗粒泥沙受大颗粒泥沙以及泥沙颗粒受近壁层流层的隐蔽作用系数；D为泥沙粒径；X为因床面粗糙或光滑而不同的具有长度量纲的物理量；E为反映床面泥沙分选程度的物理量。

小流域汇流非线性模式

杨家坦：小流域汇流非线性模式的研究。地理学报，1981，36(4)

(1) 等流时线积分方程式：

$$Q_t = \int_0^{\tau} m\left(\frac{\partial\omega}{\partial\tau}\right)_t I_{t-\tau}\mathrm{d}\tau$$

式中，Q_t 为时刻 t 汇集到流域出口的地表径流；τ 为流域中各点汇至出口处汇流时间(其中最长汇流时间为 τ_m)；$\left(\frac{\partial\omega}{\partial\tau}\right)_t$ 为 t 时刻流域的汇流曲线(即等流时线所包围面积 ω 随汇流时间 τ 的增长率)；$I_{t-\tau}$ 为在时刻 $(t-\tau)$ 的净雨强度。

(2) 无资料地区小流域汇流计算公式：

$$V = mJ^{\frac{1}{3}}Q^n$$

式中，V 为汇流速度；Q 为出流量；m 为反映坡地和河槽对水流的阻力系数；n 为反映不同流域非线性影响程度的指数。

(3) 研制诺模图的函数关系：

$$Q_m = f(V, t_c, F_c/F, \bar{I})$$

式中，Q_m 为洪峰流量($s\cdot m^3$)；V 为汇流速度($s\cdot m$)；t_c 为产流历时(h)；F_c/F 为造峰汇流面积与流域面积之比；当 $t_c<\tau$ 时，$\bar{I}$ 为产流历时的平均净雨强度，$t_c\geq\tau$ 时，$\bar{I}$ 为汇流时间的平均净雨强度($mm\cdot h^{-1}$)。

降雨径流模拟模型

方向：降雨径流模拟试验中小流量电测方法的研究．地理研究，1982，1(2)

1. 电阻式测流槽 u-Q 关系的线性化

(1) 电阻-水位关系：

$$R = \frac{C\cdot\rho\cdot l}{\tan\theta}\cdot h^{-2} = \frac{\rho l}{K_1}h^{-2}$$

式中，R 为 V 形截面棱柱体的电阻；ρ 为电阻率；l 为电阻长度；V 形槽夹角为 2θ；h 为槽中水位；$K_1=\frac{\tan\theta}{C}$，C 为实测电阻修正系数。

(2) 水位-流量关系：

$$h = K_2Q^{3/8} \approx K_2Q^{0.375}$$

$$K_2 = (K_2')^{-3/8} = \left[\frac{1}{n}I^{1/2}\frac{\alpha^{5/3}}{2^{2/3}(1+\alpha^2)^{1/3}}\right]^{-3/8}$$

式中，h 为水深；Q 为流量；K_2 为流量系数；I 为坡度；α 为边坡系数。

(3) 电压-流量关系：

$$u = \frac{K_1K_2^2K_3}{\rho\cdot l}Q^{3/4} = K_0Q^{3/4}$$

式中，u 为电压；K_1、K_2 为槽的几何形状系数；l 为电极间距；ρ 为水电阻率；K_3 为电路特性。

(4) 电压-流量关系线性化：

$$u = \frac{K_1K_2^2K_3}{\rho}$$

此式成立的条件是 $l=Q^{-1/4}$。

(5) 流量-电压关系做了线性处理后电阻变化率为：

$$\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}Q} = -\frac{3}{4}\frac{C\rho}{K_2^2}Q^{-2}\cdot\cot\theta$$

2. 电阻式测流槽动态特性的模拟

(1) 电阻式测流槽的脉冲响应：

$$U(S) = \frac{\omega_n^2}{S^2+2\zeta\omega_nS+\omega_n^2}$$

式中，$\zeta=\frac{\sqrt{R_1C_1+R_2C_2+R_2C_1}}{2}$，$\zeta$ 为系统的阻尼比；$\omega_n^2=\frac{1}{R_1C_1R_2C_2}$，$\omega_n^2$ 为无阻力自然振动频率；R_1 为水通过两腔室间消能板产生的水阻；R_2 为集水箱出口与 V 形槽产生的水阻；C_1、C_2 为集水箱腔室 1,2 的蓄容；S 为 laplace 变换算子。

(2) $\zeta\geq1$ 情况下电阻式测流槽系统的动态响应

$\zeta=1$：

$$Q(t) = 1-e^{-\omega_nt}(1+\omega_nt) \quad (t\geq0)$$

$\zeta>1$：

$$Q(t) = 1+\frac{\omega_n}{\sqrt{\zeta^2-1}}\cdot\frac{1}{2}\left(\frac{e^{-s_1t}}{S_1}-\frac{e^{-s_2t}}{S_2}\right) \quad (t\geq0)$$

式中，$S_1=\left(\zeta+\sqrt{\zeta^2-1}\right)\omega_n$，$S_2=\left(\zeta-\sqrt{\zeta^2-1}\right)\omega_n$。

流域汇流的非线性关系及其处理模型

刘昌明，王广德，吴凯：流域汇流的非线性关系及其处理方法．地理研究，1982，1(2)

1. 河槽响应函数矩与入流特性的关系

(1) 河槽滞时与入流特性的关系：

$$u_{1,r}' = 31.0I_r^{-0.342}T_r^{-0.177}$$

式中，$u'_{1,r}$ 为河槽滞时；I_r 为入流强度；T_r 为入流历时

(2) 河槽响应函数二阶中心矩与入流强度的关系：

$$u_{2,r}=146I_r^{-0.12}$$

式中，$u_{2,r}$ 为函数二阶中心矩。

2. 变滞模型的准线性解

(1) 时段净雨推流变滞模型微分方程：

$$Q(t)=\frac{1}{\prod_{i=1}^{n}(1+Kr^{i-1}D)}I(t)$$

式中，$Q(t)$ 为输出过程；$I(t)$ 为输入过程；n 为水库数，$Kr^{i-1},i=1,2,\cdots,n$ 为蓄水常数，D 为微分算符。

(2) 流域汇流变滞模型的准线性表达式：

$$Q(t)=I_1u(t)-A_1+\sum_{l=1}^{m-1}(I_{l+1}-I_l)u(t-l\Delta t)-\sum_{l=1}^{m-1}(A_{l+1}-A_l)-I_nu(t-m\Delta t)+A_m,i\neq j$$

其中，$A_1=\sum_{i=1}^{n1}\frac{I_1(r_1^{i-1})^{nl-1}}{\prod_{j=1}^{n1}(r_1^{i-1}-r_1^{j-1})}\exp\left(-\frac{t}{K_1r_1^{i-1}}\right)u(t)$

$$A_{l+1}=\sum_{i=1}^{n(l+1)}\frac{I_{l+1}(r_{l+1}^{i-1})^{n(l+1)-1}}{\prod_{j=1}^{l+1}(r_{l+1}^{i+1}-r_{l+1}^{j-1})}\exp\left(\frac{t-l\Delta t}{K_{t+1}r_{l+1}^{i-1}}\right)u(t-l\Delta t)$$

$$A_l=\sum_{i=1}^{nl}\frac{I_l(r_l^{i-1})^{nl-1}}{\prod_{j=1}^{nl}(r_l^{i-1}-r_l^{j-1})}\exp\left(\frac{t-l\Delta t}{K_lr_l^{i-1}}\right)u(t-l\Delta t)$$

$$A_m=\sum_{i=1}^{nm}\frac{I_m(r_m^{i-1})^{nm-1}}{\prod_{j=1}^{nm}(r_m^{i-1}-r_m^{j-1})}\exp\left(\frac{t-m\Delta t}{K_mr_m^{i-1}}\right)u(t-m\Delta t)$$

式中，m 为净雨时段数；I_l 为时段净雨强度；$u(t-l\Delta t)$ 为单位阶跃函数；n_l、r_l 和 K_l 均为时段净雨强度的函数

3. 模型参数的确定

(1) 一阶原点矩：

$$u'_{1,i}=u'_{1,0}\left(\frac{I_i}{I_0}\right)^j$$

式中，$u'_{1,i}$、$u'_{1,0}$ 分别为时段净雨的分相应函数和一场净雨的流域响应函数的一阶原点矩；I_i，I_0 分别为时段净雨强度和平均净雨强度；j 为流域滞时与净雨强度关系的非线性指数

(2) 二阶原点矩：

$$u_{2,i}=u_{2,0}\left(\frac{I_i}{I_0}\right)^k$$

式中，$u_{2,i}$，$u_{2,0}$ 分别为时段净雨的分相应函数和一场净雨的流域响应函数的二阶中心矩；k 为流域响应函数的二阶中心矩与净雨强度关系的非线性指数

不均匀系数的计算模型

汤奇成、李秀云：径流年内分配不均匀系数的计算和讨论．自然资源，1982，3

(1) 年平均流量值的系列连续时的不均匀系数 C_L 模型：

$$C_L=\frac{\sum_{i=1}^{n}Q_m-KQ_0}{12Q_0}$$

式中，Q_m 为大于年平均流量值的月平均流量；Q_0 为年平均流量；K 为月平均流量超过年平均流量的月数

(2) 年平均流量值的系列不连续时的不均匀系数 C_L 模型：

$$C_L=\frac{\sum_{d=1}^{n}Q_d-nQ_0-\left(mQ_0-\sum_{i=1}^{m}Q_i\right)}{365Q_0}$$

式中，Q_d 为系列中大于年平均流量值的日平均流量；Q_i 为系列中小于年平均流量值的日平均流量；n 为日平均流量超过年平均流量的日数；m 为日平均流量小于年平均流量的日数

(3) 多年平均不均匀系数 $\overline{C_L}$ 模型：

$$\overline{C_L}=\frac{\sum C_L}{n}$$

式中，n 为计算的年数

地表径流量估算

陈科信：上海地表水资源估算方法和特点．自然资源，1982，4

流域水量平衡方程：

$$P=R+Z\pm\Delta V\pm\Delta U$$

$$R=R'-\Delta R_{农}-\Delta R_{城}$$

式中，P 为流域降水量；R 为天然地表径流量；Z 为流域蒸发量；ΔV 为流域河网蓄变量；ΔU 为流域内地下水蓄变量；R' 为流域产(亏)水量；$\Delta R_{农}$ 为农业和水利化措施后所减少的地表径流量；$\Delta R_{城}$ 为工业化和城市化后所增加的耗水量。

降雨入渗补给地下水计算公式

王鸿遇，杨克定：平原地区降水入渗补给地下水的模拟试验研究方法．地理研究，1982，2(4)

(1) 达西定律：

$$q=f_p=-K(\theta)(\phi_2-\phi_1)/(Z_2-Z_1)$$

式中，$K(\theta)$为非饱和水传导系数；ϕ 为总水头；Z 为地面以下距离；$Z_2-Z_1=L_s$，如果地表水头 $\phi_1=0$，则 $\phi_2=-(L_{s1}+h)$；h 为湿润锋面处的负压力。

(2) 地表径流开始前的入渗总量：

$$F_b=h(\theta_s-\theta_0)/A/K_s^{-1}$$

式中，K_s 为饱和水传导系数；θ_s 为与土壤性质有关的常数；A 为雨强。

(3) 地表产流开始时间：

$$T=\frac{F_b}{A}$$

(4) 累计入渗量：

$$F=f(P,A)$$

式中，P 为降雨量；A 为强度。假设该函数为线性关系，可写为：$F=a+bP+cA$。式中 a,b,c 为待定的系数，根据最小二乘法的原理可计算出。

(5) 补给地下水量：

$$F_g=F-(\theta_{田}-\theta_0)L$$

如用土壤含水量表示，则：

$$F_g=F-(\rho_{田}-\rho_0)\cdot r\cdot L/10$$

式中，$\theta_{田}$ 为田间持水量；F_g 为降雨入渗补给地下水；$\rho_{田}$ 为田间持水；ρ_0 为土壤初始含水率；r 为土壤容重。

群分析的相似性统计量

司有元：丹江口水库秋汛期降水的环流特征．地理研究，1982，1(4)

(1) 距离系数：

$$d_{i,k}=\sqrt{\sum_{j=1}^{v}(x_{i,j}-x_{k,j})^2/V}$$

$$(i\neq k,\quad i,k=1,2,\cdots,N)$$

式中，$d_{i,k}$ 为第 i 个于第 k 个样本在 V 维空间中的距离；$x_{i,j}$ 为第 i 个样本第 j 个变量的观测值；N 为样本数；V 为变量数。

(2) 相似系数：

$$\cos\theta_{ip}=\sum_{j=1}^{v}(x_{ij})(x_{pj})/\sqrt{\sum_{j=1}^{v}(x_{ij})^2\sum_{j=1}^{v}(x_{pj})^2}$$

式中，$\cos\theta$ 为相似系数；i，$p=1,2,\cdots,N$ 为被比较的两个样本，N 为样本总数；x 为样本的观测值；$\cos\theta$ 选取最大者优先合并。

(3) 相关系数：

$$r_{jk}=\frac{\sum_{i=1}^{v}(x_{ij}-\bar{x}_j)(x_{ik}-\bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{v}(x_{ij}-\bar{x}_j)^2(x_{ik}-\bar{x}_k)^2}}$$

式中，j，$k=1,2,\cdots,N$ 为被比较的两个样本，N 为样本总数；x 为样本的观测值；r 的取值范围是 $0<r\leqslant1$，r 选取最大者优先合并。

(4) 样本数据标准化：

$$x_{ij}=\frac{x_{ij}-\bar{x}_j}{S_j}$$

式中，$i=1,2,\cdots,N$ 为样本数；$j=1,2,\cdots,v$ 为变量数；$\bar{x}_j$ 为第 j 个变量的平均值；S_j 为第 j 个变量的标准差；x_{ij} 为原始数据。

(5) 样本数据正规化：

$$x_{ij}=\frac{x_{ij}-x_{j_{\min}}}{x_{i_{\max}}-x_{j_{\min}}}$$

盐水入侵长度变化模型

韩乃斌：南水北调对长江口盐水入侵影响的预测。地理研究，1983，2(2)

(1) 相关分析法：

$$\frac{L_i}{L_0}=\frac{\ln\frac{S_V}{S_0}\cdot\frac{\dot{Q}}{Q_f}+2.477}{5.07}$$

式中，L_i 为引水船起5‰盐水入侵长度；L_0 为引水船与吴淞之间的距离。

(2) 憩流近似法：

$$\frac{\bar{S}_e}{S_0}=\exp\left[-\frac{V_f}{2BD_0}(X_e+B)^2\right]$$

式中，$\bar{S}_e$ 为落潮憩流时垂线平均含盐度；X_e 为落潮憩流时的纵向距离；B 为虚拟的落潮憩流时含盐度分布曲线向海方向的延伸距离。

不均匀系数

杨远东：年径流不均匀系数的分析与计算．自然资源，1983，3

$$C_L=\frac{\sum_{i=1}^{n}Q_i-nQ_0}{Q_0\Delta t}$$

式中，Q_i 为"大于"年平均流量的、按计算时段 Δt 计算的平均流量；Q_0 为按某一种计算时段 Δt 计算的年平均流量；n 为"超过"年平均流量的平均流量的时段总数。

边界条件对水库下游河床演变的影响模型

许炯心：边界条件对水库下游河床演变的影响——以汉江丹江口水库下游河道为例．地理研究，1983，2(4)

1. 河床抗冲性的定量指标

(1) 抗冲性：

$$K=\frac{\tau_C}{\tau}$$

式中，τ_C 为河床(河底或河岸)物质底临界切力；τ 为水流切力。

(2) 河岸相对于河底的抗冲性：

$$K_{相}=\frac{K_{岸}}{K_{底}}$$

式中，$K_{岸}$，$K_{底}$ 分别表示河岸，河底抗冲性。

(3) 河底抗冲性：

$$K_{底}=\frac{D}{\gamma HJ}$$

式中，D 为粒径；γ 为水的比重；H 为水深；J 为比降

(4) 河岸抗冲性：

$$K_{岸}=\frac{M}{0.76\gamma HJ}$$

(5) 相对抗冲性的经验性指标：

$$K_{相}=\frac{M}{Dm}$$

式中，M 为河岸粉砂黏土含量；m 为河岸边坡系数

2. 清水冲刷条件下的平衡纵比降

(1) Meyer-Peter 公式：

$$\tau_c=K_1(\gamma_s-\gamma)D$$

式中，τ_c 为临界切力；γ_s、γ 分别为水、沙的比重；D 为平均粒径；K_1 为常数，等于0.047

(2) 清水冲刷条件下的平衡纵比降公式：

$$J=0.559\left(\frac{\gamma_s-\gamma}{\gamma}\right)^{10/7}D^{9/7}B^{6/7}Q^{-6/7}$$

3. 河床边界条件与横断面调整的关系

(1) 宽深比 $\sqrt{B}/h$ 值的调整：

$$\sqrt{B}/h=18.96\left(\frac{M}{D_{50}m}\right)^{-0.021}\left(\frac{M}{0.76\gamma HJ}\right)^{0.089}\times\left(\frac{D_{50}}{\gamma HJ}\right)^{0.40}\left(\frac{Q}{B_0R}\right)^{-0.26}H_0^{0.35}\left(\frac{B_0'}{B_0}\right)^{0.25}\theta_{顶}^{0.008}$$

式中，R 为河湾半径；复相关系数 $r=0.84$；$\frac{B_0'}{B_0}$ 为低滩约束性，B_0' 为低滩全部被淹没时的河宽；B_0 为常水位时的河宽；$\theta_{顶}$ 为主流顶冲角。

(2) 展宽率：

受河底卵石层影响的点据用下式代表：

$$B_{展宽}=0.9107-0.2657\ln\frac{M}{0.76\gamma HJ}$$

$$(r=-0.94)$$

未受河底卵石层影响的点据用下式代表：

$$B_{展宽}=0.3499-0.1447\ln\frac{M}{0.76\gamma HJ}$$

$$(r=-0.97)$$

(3) 下切率：

$$H_{下切}=0.0408\left(\frac{D_{50}}{\gamma HJ}\right)^{-0.83} \quad (r=-0.89)$$

(4) 下切、展宽演变趋势的判别分析：

$$Y=0.7044-0.058\ln\frac{M}{D_{50}\cdot m}-$$

$$0.216\ln\frac{Q}{B_0R}-0.176\ln H_0+0.028\ln\theta_{负}$$

式中，当$Y<0$时，下切为主；当$Y>0$时，展宽为主。

喀斯特地区河流水文分析公式

汤奇成，梁扶宸：滇东桂西喀斯特地区河流水文初步分析．地理学报，1983,38(4)

(1) 年径流消耗模数：

$$M_n=M_k-M_c$$

式中，M_n为年径流消耗模数；M_k为喀斯特地区河流的年径流模数；M_c为非喀斯特地区河流的径流模数。

(2) 年径流模数与地下水补给强度系数的关系：

$$\frac{M_k}{M_c}=f(K_\varphi-K_H)$$

式中，K_φ为喀斯特地区河流冬季径流模数；K_H为非喀斯特地区河流中等水量交换的冬季径流模数。

(3) 喀斯特地区的水量平衡式：

$$\bar{P}=\bar{R}+\bar{E}+W_1-W_2$$

式中，$\bar{P}$为平均降水量；$\bar{R}$为平均径流量；$\bar{E}$为平均蒸发量；W_1为从流域流出的水；W_2为流入的水。

泥石流运动机制分析公式

钱宁，王兆印：泥石流运动机制的初步探讨．地理学报，1984, 39(1)

(1) 划分泥石流和高含沙水流的指标：

$$E_D=\gamma_s C_v J$$

式中，C_v为两相流中固体颗粒体积比浓度；γ_s为颗粒容重；J为流动的坡降；E_D为单位体积的两相混合物向下游运行单位距离中固体颗粒提供的能量。

(2) 流变方程：

$$\tau=\tau_B+\eta\varepsilon$$

式中，τ和τ_B分别为剪切应力和屈服应力；ε为剪切应变率；η为刚度系数。

(3) 可以悬浮在浆液中不沉的悬浮质最大粒径计算公式：

$$D_0=\beta\frac{6\tau_B}{\gamma_S-\gamma_f}$$

式中，β为一系数；γ_f代表单位体积颗粒所受到的浮力。

(4) 浸没于牛顿流体中的物体M受到的浮力F的计算公式：

$$F=\oiint_S -\cos Ap\mathrm{d}S$$

式中，p为流体压强；S为物体表面；$\cos A$是面积微元向量$\mathrm{d}S$与铅直向上的直角坐标轴(z轴)的夹角余弦。

(5) 泥石流中粗大颗粒的运动规律：

$$\phi=U_b h C_{Vb}\left(\frac{\gamma_f}{\gamma_s-\gamma_f}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{1}{gD_b^3}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\Theta=\frac{\gamma_f RJ}{(\gamma_s-\gamma_f)D_b}$$

式中，Θ为水流强度参数；ϕ为泥沙运动强度参数；U_b、C_{Vb}和D_b分别为推移质的平均运动速度、平均体积比浓度和代表粒径；h和R分别为泥石流的流深和水力半径；J是流动坡降；g为重力加速度。

河川径流年内分配计算公式

杨元东：河川径流年内分配的计算方法．地理学报，1984, 39(2)

(1) 集中度C_n：

$$C_n=\frac{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{12}r_i\sin\theta_i\right)^2+\left(\sum_{i=1}^{12}r_i\cos\theta_i\right)^2}}{\sum_{i=1}^{12}r_i}$$

式中，r_i为第i月份径流向量；θ_i为径流向量与垂直方向的夹角；$r_{xi}=r_i\sin\theta_i$和$r_{yi}=r_i\cos\theta_i$为它在水平、垂直两个方面的分量。

(2) 年径流不均匀系数C_i：

$$C_i=\frac{\sum_{i=1}^{n}\theta_i-n\theta_0}{12\theta_0}$$

河相关系模型

冯志德：冲积河流的河相关系．地理研究，1984，3(4)

(1) 方法一：水利几何形态法：

由一组方程式所确定的河相关系式：

$$B = aQ^b$$

$$h = cQ^f$$

$$V = kQ^m$$

$$J = eQ^z$$

式中，B 为河宽；h 为平均水深；V 为平均流速；J 为比降；Q 为流量；a、c、k、e 为系数；b，f，m，z 为指数。

(2) 方法二：利用一组联立方程式求解河相关系式：

对于平原冲击河流：

$$Q = BhV$$

水流连续方程：

$$V = \frac{1}{n} h^{2/3} J^{12}$$

悬移质输沙平衡方程：

$$S = p\left(\frac{V^3}{ghw}\right)^r$$

河相关系基本方程式：

$$B = f(h)$$

式中，n 为糙率；S 为床沙质的悬移质含沙量；w 为悬移质泥沙颗粒的沉速；p 为系数；g 为重力加速度；r 为指数。

(3) 起动平衡条件的河相关系式：

$$B = \zeta^{0.511} A^{-0.438} d^{-0.146} Q^{0.438}$$

$$h = \zeta^{0.438} A^{-0.482} d^{-0.161} Q^{0.482}$$

$$V_0 = \zeta^{0.073} A^{0.920} d^{0.307} Q^{0.80}$$

$$J = \zeta^{0.496} A^{2.50} d^{0.832} n^2 Q^{-0.482}$$

式中，$A = 1.14\sqrt{\frac{r_s - r}{r}}$，$r_s$ 为泥沙的容重；V_0 为起动流速；ζ 为常数。

(4) 以推移质输沙为主的河流的河相关系：

$$B = \zeta^{0.514} K^{0.083} (AC_0)^{-0.167} \times (gq_s w)^{-0.083} d^{-0.056} Q^{0.486}$$

$$h = \zeta^{-0.486} K^{0.083} (AC_0)^{-0.167} \times (gq_s w)^{-0.083} d^{-0.056} Q^{0.486}$$

$$V' = \zeta^{-0.028} K^{-0.166} (AC_0)^{0.334} \times (gq_s w)^{0.166} d^{0.102} Q^{0.028}$$

$$J = \zeta^{0.592} K^{-0.444} (AC_0)^{0.889} \times (gq_s w)^{0.444} d^{0.296} Q^{-0.592}$$

式中，$K = K_0 \frac{r_s r}{r_s - r}$，$K_0$ 为综合系数；$C_0 = \frac{h^{1/6}}{\sqrt{g} n}$ 为无量纲谢才系数；V' 为止动流速。

(5) 以悬移质输沙为主的河流的河相关系：

$$B = \zeta^{0.622} w^{-0.156} g^{0.156} p^{\frac{0.156}{r}} s^{\frac{0.156}{r}} Q^{0.461}$$

$$h = \zeta^{-0.466} w^{-0.134} g^{-0.134} p^{\frac{0.133}{r}} s^{-\frac{0.133}{r}} Q^{0.400}$$

$$V = \zeta^{-0.156} w^{0.200} g^{0.200} p^{\frac{-0.2}{r}} s^{\frac{0.289}{r}} Q^{0.132}$$

$$J = \zeta^{0.311} w^{0.756} g^{0.756} p^{-\frac{0.756}{r}} s^{\frac{0.756}{r}} Q^{-0.267}$$

降水量 P 模型

张天曾：从永定河东沟西沟河川径流特征看森林植被的水文作用。自然资源，1984，4

$$P = (Q + E_W) + (G_1 + G_2 + E_G) + (E_1 + E_2 + E_3)$$

式中，Q 为河川径流总量；E_W 为河川及其相联系的湖泊、沼泽等水面蒸发量；G_1 为河流出口地下断面潜流水量；G_2 为较深部地下水向外流域的流出量；E_G 为河谷、盆地潜水蒸发量；E_1 为汇水山坡土壤蒸发量；E_2 为森林植被蒸腾量；E_3 为河谷盆地土壤蒸发量。

地下水补给量模型

任鸿遵，魏忠义：京津唐平原地区地下水资源评价及其合理利用．自然资源，1985，1

$$W_{补} = W_1 + W_2 + W_3 + W_4$$

式中，W_1、W_2、W_3、W_4分别为降雨入渗、河渠入渗、灌溉回归水和山前侧向补给量。

地下水流模型

姜志林：森林生态学(六)：森林生态系统蓄水保土的功能(2)．生态学杂志，1985，2

$$q = Ka_s \frac{\Delta h}{\Delta L}$$

式中，K为渗透系数；a_s为断面面积；Δh为饱和水位之间的水位差；ΔL为渗透经过的距离；$\frac{\Delta h}{\Delta L}$为水力梯度；$q/a_s$为渗透速度。

南水北调东线水质污染和湖泊水生经济的系统分析模型

王景华，杜伟：南水北调东线水质污染和湖泊水生经济的系统分析．地理研究，1985，4(4)

(1) 污水治理的经济问题——总投资计算公式：

$$T_c = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{p_i}{n}(C_1W_1 + C_2W_2)$$

式中，T_c为n年的总投资；P为投资折现率，$P=\frac{1}{1+r}$；r为利息率；C_1为单位污水量的分散处理费用；W_1为分散处理污水量；C_2为单位污水集中处理费用；W_2为集中处理污水量。

(2) 最优湖泊运用蓄水位分析模型：

$$T_n = \max[BF(ZS) + BP_1(Z_1A_1) + BP_2(Z,A_2) + \cdots + BP_n(Z,A_n)]$$

式中，T_n是最优水生经济产品总产值；Z为湖泊蓄水位；S为渔业产品自销价值；BF为渔业产值函数；BP_i为第i种水生植物产值函数；A_i为第i种水生植物种植面积。

限制方程组如下：

1) 各种水生经济植物种植面积的限制：

$$A_{\min i} \leqslant A_i \leqslant A_{\max i}$$

式中，A为水生经济植物的规划种植面积；$A_{\min i}$为最小可种植面积；$A_{\max i}$为最大可繁殖面积。

2) 水位限制：

$$Z_d \leqslant Z \leqslant Z_n$$

式中，Z为实际水位；Z_d为设计死水位；Z_n为规划设计的正常蓄水位。

3) 市场经济限制：

$$S_{\min} \leqslant S \leqslant S_{\max}$$

式中，S为模型计算出的自销价值；$S_{\max}$为最大规划自销价值量；$S_{\min}$为一定的社会需求。

4) 各种水生经济产品的产值限制：

各种水生经济产品的产值不应该超过湖泊自身的生产能力：

$$BF(Z,S) \leqslant BF_{\max}$$

$$BP_i(Z,A_i) \leqslant Bp_{\max i}$$

年陆地蒸发量计算公式

杨家坦：湿润地区年陆地蒸发量系列分析与应用．地理研究，1986，5(1)

(1) 年陆地蒸发量计算公式：

$$E_i = P_i - R_i \pm \Delta W_i$$

式中，E_i，P_i，R_i分别为年陆地蒸发量、年降水量、年径流深；ΔW_i为年初、年末流域蓄水量。

$$\Delta W_i = \Delta W_{i,1} + \Delta W_{i,2}$$

式中，$\Delta W_{i,1} = E_{冬日}(t_{初} - t_{末})$为年初、年末流域包气带土壤含水量的蓄变量，$t_{初}$，$t_{末}$分别为年初、年末流量地下水退水历时，$E_{冬日}$为流域冬季陆地蒸发量；$\Delta W_{i,2} = R_{e,初} - R_{e,末}$为年初、年末流域地下水和河槽水的蓄变量，$R_{e,初}$，$R_{e,末}$分别为年初、年末流量。

(2) 流域冬季陆地蒸发量计算公式：

$$E_{冬日} = \frac{E_{年} - E_{3\sim10月}}{t_{冬日}}$$

式中，$E_{年}$，$E_{3\sim10月}$分别为年陆地蒸发量和3~10月陆地蒸发量；$t_{冬日}$为1~2月和11~12月的历时。

(3) 年径流统计参数计算式：

$$C_{V,R} = \frac{\sigma_R}{R} = \frac{\sigma_R}{\alpha P} = \frac{\sigma_R}{\sigma_P} \cdot \frac{C_{V,P}}{\alpha}$$

式中，$C_{V,R}$为雨量站点年径流变差系数；$C_{V,P}$为雨量站点年降水量变差系数；$\overline{\alpha}$为雨量站点多年平均年径流系数；K为年径流深均方差σ_R与年降水量均方差σ_n的比值。

(4) 年径流深均方差σ_R的计算式：

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(R_i - \overline{R})^2}{n-1}}$$

式中，R_i 为年径流深；$\overline{R}$ 为多年平均年径流深；n 为年径流深系列年数。

(5) 年降水量均方差 σ_n：

$$\sigma_P = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - \overline{P})^2}{n-1}}$$

式中，P_i 为年径流深；$\overline{P}$ 为多年平均年径流深；n 为年径流深系列年数。

河网密度与流域形态的经验关系式

陈浩：陕北黄土高原沟道小流域形态特征分析. 地理研究，1986，5(1)

$$D_d = K(T)^m(A)^{-n}(H)^t$$

式中，T 为干流长度；A 为流域面积；H 为流域高差；K、m、n、t 为系数。

地下水资源的计算公式

李世忠：山西运城盆地浅层地下水资源计算及其合理利用. 自然资源，1986，2

(1) 地下水补给资源 Q_b 模型：

$$Q_b = Q_s + Q_l + Q_j + Q_g + Q_w$$

式中，Q_b 为地下水补给资源总量；Q_s 为大气降水入渗补给量；Q_l 为山区地表径流出山口后渗漏补给量；Q_j 为山区地下径流侧向补给量；Q_g 为提倡黄河水渠道渗漏补给量；Q_w 为引黄灌溉入渗补给量。

(2) 地下水消耗量 Q_t 模型：

$$Q_t = Q_p + Q_h + Q_y + Q_k$$

式中，Q_t 为地下水消耗总量；Q_p 为地下水蒸发量；Q_h 为地下水排向湖沼的水量；Q_y 为地下水排向黄河的水量；Q_k 为地下水开采量。

水位涨落率模型

王洪道：我国东部平原湖泊水资源分析. 自然资源，1986，2

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q - q}{F_h}$$

式中，$\frac{dh}{dt}$ 为 dt 时段内的水位涨落率；Q 为 dt 时段内湖泊入流量；q 为 dt 时段内湖泊出流量；F_h 为湖泊水位为 h 时的湖水面积。

某点的电阻率与该处的水分含量的关系模型

张学栋，姜述孟：黄土降雨入渗过程中水分分布平衡点运动规律的研究. 水土保持通报，1986，1(29)

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{(N_W)t_0}{(N_W)t_1}$$

式中，ρ_0 和 ρ_1 分别为时刻 t_0 和 t_1 时的电阻率；$(N_W)t_0$ 和 $(N_W)t_1$ 分别为时刻 t_0 和 t_1 时的水分量。

泥石流沟综合评判的数学基础

谭炳炎：泥石流沟严重程度的数量化综合评判. 水土保持通报，1986，1(29)

(1) 河沟的评判总得分 N 模型：

$$N = A + B + C$$
$$A = \sum_{i=1}^{5} a_{ij}$$
$$B = \sum_{i=1}^{5} b_{ij}$$
$$C = \sum_{i=1}^{5} c_{ij}$$
$$j = 1,2,3,4$$

式中，A 为地貌因素得分；B 为河沟因素得分；C 为地质因素得分；i 为各因素项目；j 为类目。

(2) 综合评判判别条件模型：

严重：$N > N_1$

中等：$N_1 > N > N_2$

轻微：$N_2 > N > N_3$

没有：$N_3 > N$

式中，

$$N_1 = \frac{1}{2}\left(\sum_{i=1}^{5} a_{i1} + \sum_{i=1}^{5} b_{i1} + \sum_{i=1}^{5} c_{i1} + \sum_{i=1}^{5} a_{i2} + \sum_{i=1}^{5} b_{i2} + \sum_{i=1}^{5} c_{i2} +\right),$$

$$N_2 = \frac{1}{2}\left[\left(\sum_{i=1}^{5} a_{i2} + \sum_{i=1}^{5} b_{i2} + \sum_{i=1}^{5} c_{i2}\right) + \left(\sum_{i=1}^{5} a_{i2} + \sum_{i=1}^{5} b_{i2} + \sum_{i=1}^{5} c_{i2}\right)\right],$$

$$N_3=\frac{1}{2}\left[\left(\sum_{i=1}^{5}a_{i3}+\sum_{i=1}^{5}b_{i3}+\sum_{i=1}^{5}c_{i3}\right)+\left(\sum_{i=1}^{5}a_{i4}+\sum_{i=1}^{5}b_{i4}+\sum_{i=1}^{5}c_{i4}\right)\right]$$

水文频率曲线的线型模型

梁季阳，谢明：水文频率曲线的线型研究　地理研究，1986，5(2)

1．线型研究的评价标准(两种目标函数形式)

$$S_1=\sum_{i=1}^{n}\left(K_{i实}-K_{i计}\right)^2$$

$$S_2=\sum_{i=1}^{n}\left|H_{i实}-H_{i计}\right|$$

式中，$K_{实}$、$K_{计}$分别为实测与计算的模比系数；$H_{实}$、$H_{计}$分别为实测与计算的雨量值。

2．观测数据的频率曲线拟合

(1) P—Ⅲ型分布函数：

$$F(x)=\frac{\beta^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)}\int_{x}^{\infty}\left[(x-b)\alpha-I_0-\beta(x-b)\right]\mathrm{d}x$$

(2) 对数P—Ⅲ型分布函数：

$$F(y)=\frac{\beta^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)}\int_{x}^{\infty}(y-b)^{\alpha-1}e^{-\beta(y-b)}\mathrm{d}y$$

(3) 耿贝尔分布函数：

$$F(x)=1-\exp\left[-e^{-\alpha(x-x_0)}\right]$$

(4) 对数耿贝尔分布函数：

$$F(y)=1-\exp\left[-e^{-\alpha(y-y_0)}\right]$$

(5) 对数正态分布函数：

$$\begin{cases}F(t)=\dfrac{1}{\sqrt{2\pi}}\displaystyle\int_{t}^{\infty}e^{-t^2/2}\mathrm{d}t\\ t=\dfrac{y-a}{\sigma}\end{cases}$$

鱼鳞坑的水力性质及设计指标的计算模型

窦玉青：鱼鳞坑的水力性质及设计指标　水土保持通报，1986，4(3)

1．坡面无鱼鳞坑的径流特性

坡面单宽径流量q模型：

$$q=(q_r-q_i)\ l\cos\alpha$$

$$\cos\alpha=\frac{1}{\sqrt{1+I^2}}$$

式中，α为坡面坡度；I为坡面比降；l为离分水岭坡长；q_r,q_i分别为坡面径流在稳定情况下的降雨强度和入渗强度。

2．鱼鳞坑水力性质及设计

(1) 单宽坡面径流量模型：

$$q_{单}=\frac{l}{N}(q_r-q_i)\cos\alpha$$

式中，$q_{单}$为坡面径流未从鱼鳞坑漫溢时，单位时间内每个鱼鳞坑的单宽坡面径流量；l为坡面总长度；N为坡面上鱼鳞坑列数。

(2) 单位时间内每个鱼鳞坑平均汇流总量$Q_{单}$模型：

$$Q_{单}=\frac{l(b+d)}{2N}(q_r-q_i)l\cos\alpha$$

式中，b为鱼鳞坑宽；d为行间距离；$\frac{l}{N}$为列间距离。

河流水质分析公式

唐以剑：区域河流水质的模糊聚类分析　地理学报，1986，41(3)

(1) 各个参量污染指数(P_I)：

$$P_I=\sqrt{\left(\max\left|\frac{C_i}{S_i}\right|\right)\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{C_i}{S_i}\right)}$$

式中，C_i为污染物质i的实测浓度；S_i为污染物质i的评价标准浓度；n为测定次数。

(2) 各条河流水质的类污染指数(P_J)：

$$P_J=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}P_I$$

式中，m为测定的参量数。

(3) 区域河流水质污染等级指数(I_W)：

$$I_W=\log_2\frac{P_J}{B_n+SD}$$

式中，B_n 为污染浓度数学期望；SD 为标准差。

二阶有序法的建立

周成虎，汤奇成：河川径流动态变化规律研究新方法——二阶有序法 地理学报，1986，41(4)

(1) 年差系数的计算公式：

$$C=\frac{1}{2n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{Q_i-\overline{Q}}{Q_{max}+Q_{min}}\right|$$

式中，$\overline{Q}$ 为年平均径流量；Q_i 为日径流量；Q_{max} 和 Q_{min} 分别为年最大和最小日径流量；n 为一年内天数。

(2) 邻差系数计算公式：

$$A_{(i)}=\frac{1}{2}\left|\frac{Q_i-Q_{i-1}}{Q_i+Q_{i+1}}\right|$$

式中，$A_{(i)}$ 为邻差系数。

(3) 特征度 $D_c(j)$ 计算公式：

$$D_c(j)=\frac{\overline{Q}_{Pc}(j)}{\overline{Q}}\frac{K_{Pc}(j)}{n}$$

式中，$\overline{Q}_{Pc}(j)$ 为特征期内平均流量；$K_{Pc}(j)$ 为特征期长度。

(4) 优势度 $D_s(j)$ 的计算公式：

$$D_s(j)=\frac{\overline{Q}_{P_s}(j)}{\overline{Q}}\frac{1-P_s(j)}{n}$$

式中，$\overline{Q}_{P_s(j)}$ 为优势期径流平均值；$P_s(j)$ 为优势期长度。

地下含水层动态模型

李笃三、许有鹏：石家庄东部平原区地下水资源合理利用与保护问题的探讨 自然资源，1986，4

$$H'_{R-1}=\frac{Q_P+Q_R+Q_1+Q_B+Q_n+Q_A-Q_u-Q_E}{A\mu}+H_R$$

式中，H_R 为 R 时段地下水埋深值；μ 为重力给水度；A 为换算系数；Q_P、Q_R、Q_1、Q_B、Q_n，Q_A、Q_u，Q_E 分别为降水入渗补给、河道入渗补给、渠道入渗补给、灌溉回归补给、外渗及误差综合相、人工回灌补给、浅层地下水开采和潜水蒸发。

喀斯特地貌演化与喀斯特含水层特性相关模型

宋林华：喀斯特地貌演化与喀斯特含水层特性 地理研究，1986，5(4)

1. 达西定律

(1) 层流：

$$Q=KIW$$

$$V=KI=K\frac{dh}{dl}=-\frac{1}{2\mu}\cdot\frac{dp}{dx}\left(b^2-y^2\right)$$

式中，Q 为流量；K 为渗透系数；I 为水力坡度；W 为过水断面面积；h 为水位；l 为两水位测量点之间的距离；μ 为水的黏滞系数；p 为水的压强；b 为裂隙宽度；y 为流速测量点到裂隙宽度中心点的距离；x 为水流流程。

(2) 絮流：

$$Q=KI^{\frac{1}{2}}W$$
$$V=KI$$

(3) 纳维埃-司托克斯方程式和连续方程式：

$$x-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+V\nabla^2u_x=\frac{\partial u_x}{\partial t}+u_x\frac{\partial u_x}{\partial x}+u_y\frac{\partial u_x}{\partial y}+u_z\frac{\partial u_x}{\partial z}$$

$$x-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+V\nabla^2u_y=\frac{\partial u_y}{\partial t}+u_x\frac{\partial u_y}{\partial x}+u_y\frac{\partial u_y}{\partial y}-u_z\frac{\partial u_y}{\partial z}$$

$$x-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+V\nabla^2u_z=\frac{\partial u_z}{\partial t}+u_x\frac{\partial u_z}{\partial x}+u_y\frac{\partial u_z}{\partial y}+u_z\frac{\partial u_z}{\partial z}$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x}+\frac{\partial u_y}{\partial y}+\frac{\partial u_z}{\partial z}=0$$

2. 喀斯特地貌发育的动力方程式

(1) 冰州石的溶解方程式：

$$\frac{dCa}{dt}=K_c\frac{A}{V}(Ca_s-Ca)^2$$

式中，Ca 为 Ca^{2+} 的克分子浓度；Ca_s 为饱和度；A 为冰州石粉的总表面积；V 为水溶液体积；K_c 为反应速度常数。

(2) 碳酸盐岩地区的剥蚀量 $D(T/a)$：

$$D = K \cdot \frac{1}{t_R} \int_0^t Q(t)(H+S)(t) dt$$

式中，Q 为流量；H 为水中 Ca+Mg 的硬度；S 为含沙量；K 为计算系数；t_R 为观测时段。

(3) 剥蚀速度：

$$D_r = \frac{1}{A} \frac{K'}{\rho} \frac{1}{t_R} \sum_{i=1}^{n} Q_i (H+S)_i t_i$$

式中，A 为碳酸盐岩分布面积；ρ 为碳酸盐岩的密度；K' 为换算系数。

(4) 剥蚀速度(仅为化学剥蚀速度)：

$$D_r = \frac{100}{\rho \sqrt[3]{4}} \left(\frac{K_C K_{H_2CO_3} K_{CO_2}}{K_{HCO_3}} \right)^{\frac{1}{3}} P_{co_2}^{\frac{1}{3}} (P-E)$$

式中，K_C 为 $CaCO_3 \Leftrightarrow Ca^{2+} + CO_3^{2-}$ 的平衡常数；$K_{H_2CO_3}$ 为 $H_2CO_3 \Leftrightarrow H^+ + HCO_3^-$ 的平衡常数；K_{HCO_3} 为 $HCO_3^- \Leftrightarrow H^+ + CO_3^{2-}$ 的平衡常数；K_{CO_2} 为 $CO_{2(气)} \Leftrightarrow CO_{2(溶)}$ 和 $CO_{2(溶)} + H_2O \Leftrightarrow H_2CO_3$ 的平衡常数。

历年的历史旱涝等级计算

陈家其：南宋以来太湖流域大涝大旱及近期趋势估计. 地理研究，1987，6(1)

$$P = \sum_{i=1}^{n} (a_{ji} + c_j) D_{ji}$$

$$D_{ji} = \frac{E_i b_{ji}}{\sum_{j=1}^{n} E_i b_{ji}}$$

式中，D_{ji} 为 j 年、i 站点的变权系数；E 为基本权系数。

冰川水资源的估算模型

杨针娘：中国冰川水资源 ——、中国冰川. 自然资源，1987，1

(1) 冰川融水径流模数 M 模型：

$$M = a_k a_s (a_m + M_s)$$

式中，a_k 为气候修正系数；a_s 为冰川消融区比率修正系数；a_m 为不同雪线高度的冰川融水径流模数修正值；M_s 为典型冰川区冰川融水径流模数。

(2) 冰川融水径流量 W 模型：

$$W = 86.4 M \cdot t \cdot F_1$$

式中，t 为冰川消融期；F_1 为冰川面积。

山地最大降水高度数学模型

阎育华，赖洪年：利用降水年平均递增率求山地最大降水高度. 地理研究，1987，6(1)

(1) 傅抱璞山地降水经验公式：

$$P_z = -az^2 + 2aHZ + [P_h - a(2H-h)h]$$

式中，P_z 为海拔为 z 的山地降水量；P_h 为海拔为 h 的山麓降水量；H 及 a 为与地区、季节有关的参数。

(2) 降水平均递增率 Γ：

$$\Gamma = \frac{P_z - P_h}{Z - h}$$

(3) 参数 H，a 的求解：

$$\begin{cases} a = -A \\ H = \frac{1}{2}\left(h - \frac{B}{A}\right) \end{cases}$$

式中，

$$\begin{cases} A = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Z_i - \overline{Z})(\Gamma_i - \overline{\Gamma})}{\sum_{i=1}^{n}(Z_i - \overline{Z})^2} \\ B = \overline{Z} - A\overline{Z} \end{cases} ; \quad \begin{cases} \overline{\Gamma} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Gamma_i \\ \overline{Z} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Z_i \end{cases} ;$$

h，Z_i 分别为测站的高度；P_h、P_i 为降水量。

水面蒸发估算模式

洪嘉链，王淑清：京津唐地区水面蒸发估算及其分布特征. 地理研究，1987，6(1)

(1) 水面蒸发回归方程：

$$E_0 = 0.144(1 + 0.75u_{1.5})(e_0 - e_{1.5})$$

式中，E_0 为水面蒸发力；$u_{1.5}$ 为 1.5m 高度处的风速；e_0 为水面的饱和水汽压；$e_{1.5}$ 为 1.5m 高度空气实际水汽压。

(2) 马格努斯公式：

$$e_0 - e_{1.5} \approx D + \frac{de_0}{dT}\bigg|_{T=T_{1.5}} (T_0 - T_{1.5}) = D + d(T_{1.5})(T_0 - T_{1.5})$$

式中，D 为空气饱和差；T_0 为水面温度；$T_{1.5}$

为 1.5m 高度空气温度；$\frac{de_0}{dT}$ 为 $T_0=T_{1.5}$ 时饱和水汽压曲线的斜率

Minkowski 距离模型

张子安，齐雨藻，林宗炎：应用系统聚类分析的方法评价珠江流域北江水系的水质状况 生态学报，1987，7(1)

$$d_{il}=\left[\sum_{k=1}^{p}\left|y_{ik}-y_{lk}\right|^{2}\right]^{\frac{1}{2}}$$

式中，$y_{ij}=\dfrac{x_{ij}-\min\limits_{1\le i\le n}\{x_{ij}\}}{\max\limits_{1\le j\le n}\{x_{ij}\}-\min\limits_{1\le i\le n}\{x_{ij}\}}$；$x_{ij}$ 为第 i 个采样点上第 j 个水质项目的实测数据。

暴雨标准确定模型

周佩华，王占礼：黄土高原土壤侵蚀暴雨标准 水土保持通报，1987，7(1)

起流历时 t 的天然降雨强度 i_2 模型：

$$i_2=10^{\frac{\lg E_3-\lg 23.49-\lg t}{1.27}}$$

式中，E_3 为起流历时 t 的模拟降雨总动能。

暴雨区划方法及模型

郑进上，王楠华，张薇：中国暴雨区划初步研究 地理学报，1987，42(2)

(1) 相关分析法：

$$r=\frac{\sum\limits_{i=1}^{m}(X_{Ki}-\overline{X}_{Ki})(P_{ij}-\overline{P}_{ij})}{\left[\sum\limits_{i=1}^{m}(X_{Ki}-\overline{X}_{Ki})^{2}\cdot\sum\limits_{i=1}^{m}(P_{ij}-\overline{P}_{ij})^{2}\right]^{1/2}}$$

式中，$X_{Ki}=\frac{1}{n}\sum\limits_{j=1}^{n}P_{ij}$，$n$ 为 K 区域内均匀分布的雨量站数；P_{ij} 为第 i 年第 j 个站的年雨量(或 5~9 月总雨量)；r 为相关系数；m 为所选资料年数。

(2) 聚类分析法：

$$D_{rK}=\min\{D_{pK},D_{qK}\}$$

式中，D_{rK} 为任意类 K 与新类 $G_r=\{G_p,G_q\}$ 之间的最小距离(p，q 表示样品间距离最小的两个站)；$d_{ij}=\left[\sum\limits_{K=1}^{m}(x_{iK}-x_{jK})^{2}\right]^{1/2}$ 为各样品之间的距离(d_{ij} 为欧氏距离，x 为 24h 暴雨年最大值，i、j 分别表示两个站)

降水量 R 计算公式

余柞梁：水文要素与高程的关系 地理研究，1987，6(2)

$$R=\frac{1}{g}\int_0^t\int_{P_s}^{P_0}\omega_s F^{*}\mathrm{d}p\mathrm{d}t$$

式中，ω_s 为由地形引起的近地层空气上升速度；F^{*} 为凝结函数；P_0、P_s 为计算气层上下界的气压；g 为重力加速度；t 为时间。

河水的化学稳定性指数和侵蚀系数

张立成，赵桂久，董文江等：湘江水系河水的地球化学特征 地理学报，1987，42(3)

(1) 河水稳定性指数：

$$\rho=\frac{2\sqrt{I}}{1+\sqrt{I}}$$

式中，$I=2.5\times10^{-5}c$，c 为水的含盐量($\mathrm{mg^{-1}}$)。

(2) 化学侵蚀系数：

$$I_i=C_i\cdot Q_i/S_i$$

式中，I_i 为化学侵蚀系数($\mathrm{t\cdot a^{-1}\cdot km^{-2}}$)；$C_i$ 为河水的含盐量($\mathrm{t\cdot m^{-3}}$)；Q_i 为河流河段河水总径流量($10^8\mathrm{m}^3$)；S_i 为相应断面的集水面积(km^2)。

协调分析的通用数学模型

周诚虎，汤奇成：区域水资源协调分析 地理学报，1987,42(3)

$$z=\underset{n_i}{opt}[H_1(x_d),H_2(x_d),\cdots,H_m(x_d)]$$

$$Q_K(x)\leqslant B_K$$

式中，$K=1,2,\cdots,L$；$x\geqslant0$；$Q_K(x)$ 为约束条件方程；$H_i(x_{d_i})=\underset{i}{opt}[f_{i1}(x),f_{i2}(x),\cdots,f_{in_i}(x)]$，$f_{ij}(x)$ 为第 i 子区域的第 j 个目标函数；B_K 为约束参变常量；x 为决策变量。

关联度模型

王礼先，刘晓波：系统工程原理在流域土地规划中的应用——以山西省中阳县白草沟小流域为例 水土保持通报，1987，7(3)

$$\gamma_i=\frac{1}{N}\sum_{K=1}^{N}\xi_i(K)$$

$$\xi_i(K)=\frac{\min\limits_i\min\limits_k|X_0(k)-X_i(k)|+0.5\max\limits_i\max\limits_k|X_0(k)-X_i(k)|}{|X_0(k)-X_i(k)|+0.5\max\limits_i\max\limits_k|X_0(k)-X_i(k)|}$$

式中，$\xi_i(K)$为第K个时刻比较曲线$\{X_i\}$与参考曲线$\{X_0\}$的相对差值，称为X_i对X_0在K时刻的关联系数。

模式计算公式

李丽娟：黄河水体中重金属的形态分配．地理学报，1987，42(4)

$$T_{OT}M_i=[M_i]+\sum_{j,k}\alpha_{ijk}[C_{ijk}]+\sum_j\delta_{ij}[S_{ij}]$$

$$T_{OT}L_j=[L_j]+\sum_{i,k}\alpha_{ijk}[C_{ijk}]+\sum_i\eta_{ij}[S_{ij}]$$

式中，$C_{ijk}=(M_i)_\alpha(L_j)_\beta(H)_\gamma$为金属$M_i$与配位体$L_j$生成的络合物，其中$i$为第$i$种金属，$j$为第$j$种配位体，$k$为第$k$种$M_i-L_j$络合物，$\alpha$，$\beta$，$\gamma$分别代表金属、配位体和$H$在络合物$C_{ijk}$中的化学计量系数；$[C_{ijk}]=K_{ijk}[M_i]^\alpha[L_j]^\beta[H]^\gamma$，其中$K_{ijk}$为络合物的稳定常数；$S_{ij}=(M_i)_\delta(L_j)_\eta(H)_\lambda$为金属$M_i$与配位体$L_j$生成的沉淀；$\delta$，$\eta$，$\lambda$意义与$\alpha$，$\beta$，$\gamma$相同；$[S_{ij}]$为每升溶液中固相的摩尔数。

圣维南方程组

陆忠臣，贾亚非，曹钦真等：试论黄河下游北岸可能决口地段及其最大淹没范围．地理研究，1987，6(4)

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=0$$

$$\frac{\partial Z}{\partial x}+\frac{V}{g}\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t}=-S_f$$

式中，$A=A(t,h)$为断面面积；$Q=Q(x,t)$为流量；$Z=Z(x,t)$为水位；V为断面上的平均流速；t为时间；x为沿河的横坐标；$h=Z(x,t)-Z_0(x)$为水深；$Z_0(x)=Z(x,t)\mid_{h=0}$为河底高程；$S_f=n^2Q^2/A^2h^{2/3}$为阻力项，n为曼宁糙率系数。

多年平均陆面蒸发量计算公式

杨远东：多年平均陆面蒸发量的计算．地理研究，1987，6(4)

$$E/r=\tanh D(E_0/r)$$

式中，E为陆面蒸发量；E_0为蒸发力；r为降水量；tanh为双曲正切函数符号；D为参变量，$0\leqslant D\leqslant 1$。

综合灌溉定额计算公式

陈隆亨，曲耀光：河西地区水、土资源的合理开发利用．地理学报，1988，43(1)

$$I_{计}=(I-RK)\frac{E_{计}}{E}-(R_{计}K)$$

式中，$I_{计}$为计算地区的综合净灌溉定额($m^3\cdot hm^{-2}$)；I为实验地区的综合净灌溉定额($m^3\cdot hm^{-2}$)；R为实验地区作物生长期(4~9月)的降水量($m^3\cdot hm^{-2}$)；$R_{计}$为计算地区作物生长期(4~9月)的降水量($m^3\cdot hm^{-2}$)；$E_{计}$为计算地区作物生长期(4~9月)的蒸发量(mm)；E为实验地区作物生长期(4~9月)的蒸发量(mm)；K为有效降雨系数(0.2)。

山地降水垂直分布模式

蒋忠信：山地降水垂直分布模式讨论．地理研究，1988，7(1)

(1) 傅氏山地降水经验公式：

$$P_z=-az^2+2aHZ[P_h-a(2H-h)h]$$

式中，P_z为海拔高度Z(m)处的山地降水量；P_h为海拔高度h(m)的山麓降水量；H为最大降水高度；a为系数。

(2) 山地降水模式：

$$P_2=ae^{-b(Z-H)^2+C}$$

式中，P_2为山地降水的分部函数；a，b，c及H最大降水高度为系数。

泥石流转化的条件

田连权：亚热带山区泥石流的形成过程．地理研究，1988，7(2)

(1) 泥石流的浓化：

$$Q_c'=Q_c+Q_s=(1+c'-c)Q_c$$

式中，Q_c'为浓化后泥石流流量；Q_c为浓化前泥石流流量；Q_s为土体补给量；c和c'分别为浓化前、后土体与泥石流体体积比值。

(2) 泥石流的稀释：

$$Q_1=(c_1-c_2)Q_c'$$

$$Q_2=(c_1-c_3)Q_c'$$

$$Q_3=(c_2-c_2)Q_c'$$

式中，Q_1为稀释前流体的土体；Q_2为稀释后流体的

主体；Q_3 为流体体积之比值。

汾河水库泥沙淤积灰色模型

袁嘉祖，苏人琼：汾河水库淤积及其防治．自然资源，1988，2

GM(1,1)模型方程：

$$\hat{X}^{(1)}(k+1)=\left[X^{(0)}(1)-\frac{u}{a}\right]e^{-ak}+\frac{u}{a}$$

水平衡方程

陈传友：西藏水资源供需分析及扩大其利用的途径．自然资源，1988，2

$$W_2+W_3=F(R_S-h)$$

式中，W_2,W_3 分别为年平均注入湖泊的地表径流量和地下径流量；F 为湖泊的平均水面面积；R_S 为湖泊的年水面蒸发强度；h 为湖面降水深。

估算古水文要素的模型

曹银：古水文及其研究方法．地理研究，1988，7(2)

(1) 河相关系法：

$$M=\frac{m_c+W+m_b+2d}{W+2d}$$

式中，M 为粉沙-黏土含量；m_c，m_b 分别为河床、河岸的粉沙-黏土百分含量；W 为河宽；d 为河深。

$$F=255M^{-1.08} \quad (r=0.91,\ Se=0.20)$$

$$P=0.94M^{0.25} \quad (r=0.91,\ Se=0.06)$$

$$P=3.5F^{-0.2} \quad (r=0.89,\ Se=0.06)$$

$$W=2.3\frac{Q_{ma}^{0.58}}{M^{0.27}} \quad (r=0.94,\ Se=0.13)$$

$$W=37\frac{Q_{ma}^{0.38}}{M^{0.39}} \quad (r=0.93,\ Se=0.14)$$

$$D=0.09M^{0.35}Q_{ma}^{0.42} \quad (r=0.86,\ Se=0.13)$$

$$D=0.6M^{0.34}Q_{ma}^{0.29} \quad (r=0.89,\ Se=0.13)$$

$$F=21.4\frac{Q_{ma}^{0.18}}{M^{0.74}} \quad (r=0.93,\ Se=0.15)$$

$$F=56\frac{Q_{ma}^{0.1}}{M^{0.74}} \quad (r=0.93,\ Se=0.15)$$

$$L=234\frac{Q_{ma}^{0.48}}{M^{0.74}} \quad (r=0.93,\ Se=0.15)$$

$$L=1890\frac{Q_{ma}^{0.34}}{M^{0.74}} \quad (r=0.96,\ Se=0.19)$$

$$\lg Q_{ma}^{0.48}=0.268+0.469\lg M-1.378W$$

$$S_c=60M^{0.38}Q_{ma}^{0.32} \quad (r=0.48,\ Se=0.16)$$

式中，F 为宽深比；P 为曲率；Se 为比降；W 为河宽；D 为河深；L 为河曲波长；Q_{ma} 为年平均洪峰流量。

(2) 地貌-水力学法：

$$V_{r(ma)}=\frac{0.7908}{N}R^{\frac{1}{6}}\sqrt{Rs}+0.1411$$

$$Q_{r(ma)}=\frac{0.9208}{N}A_cR^{\frac{1}{6}}\sqrt{Rs}+2.3616$$

式中，V_r，Q_r 为实测的流速河流量；V_c，Q_c 为根据谢才-满宁公式计算出的流速和流量。

(3) 水力学方法：

$$q_c=25.64C_1^{5/3}/D^{3/2}/S^{7/6}$$

$$Q_c=\left(25.64C_1^{5/3}/D^{3/2}/S^{7/6}\right)W=q_cW$$

式中，q_c 为古水流的临界单宽流量；D 为典型颗粒；S 为河床比降；C_1 为与 Shields 函数有关的古水流流速系数，$C=\psi\left(r^s-r\right)r$，$r^s$ 为泥沙容重；r 为水的容重；ψ 为希尔兹的推移质输沙函数。

(4) 古水系方法：

$$Q=0.063D^{1.59}$$

式中，Q 为每 km^2 上的年平均洪峰流量；D 为河网密度。

卤水蒸发模式

洪嘉链，卢瑞芝：我国北方四大盐海区卤水蒸发计算及其分布．地理研究，1988，7(2)

$$E_{卤}=\left\{\frac{\Delta}{\Delta+r}\left[0.5752R_a\left(a-b\frac{n}{N}\right)+11.456\right]/L+\frac{r}{\Delta+r}\left[0.275(1+0.22u_{10})(e_a-e_d)\right]\right\}\times\left[1-0.011(1-r_1)^{-0.379}(Be')^{1.001}\right]$$

式中，$E_{卤}$ 为大面积卤水蒸发量；Δ 为气温等于饱和

水汽压曲线的斜率；r 为干湿表常数；L 为汽化潜热；R_a 为天文辐射；n/N 为日照百分率；a、b 为天文辐射与日照百分率计算太阳总辐射系数；e_a 为水面饱和水汽压；e_d 为高度 1.5m 高度空气实际水汽压；u_{10} 为特定高度的风速；Be' 为卤水浓度。

黄土地区修建淤地坝的洪水标准设计模型

黄国俊，蒋定生：黄土地区修建淤地坝的设计洪水标准。水土保持通报，1988，8(2)

1. 洪水设计标准与工程投资

(1) 不同频率下的洪峰流量 Q_p 模型：

$$Q_p = M_m F$$

式中，M_m 为设计洪峰模数；F 为流域面积。

(2) 各频率下洪水总量 W_p 模型：

$$W_p = FR$$

式中，R 为降雨径流量。

2. 设计洪水标准与垮坝损失

(1) 坝体决口损失 K_p 模型：

$$K_p = \frac{b}{L}$$

式中，b 为决口断面宽度；L 为淤地坝坝顶长度。

(2) 下游冲毁损失模型：

$$Q_{np} = K_i L_i H^{\frac{3}{2}}$$

$$K_i = 0.9 K_p^{0.75}$$

式中，Q_{np} 为溃坝流量；K_i 为考虑溃坝时决口可能的宽度与坝长之比和出溢条件的系数；L_i 为在极限洪水位时上游水面线与坝坡面接合长度；H 为溃坝前上下游水位差。

3. 适宜设计洪水标准的确定

不同设计洪水标准下的最小费用 C_P 模型：

$$C_P = (G+\delta)S + (y_c + y_n)P$$

式中，G =0.12 为投资经济效益标准系数；$\delta = 0.5$ 为考虑到日常维修费用的系数；S 为每种洪水设计标准下的建坝总投资；$y_c + y_n$ 为各设计洪水标准下溃坝后所带来的经济损失。

因子量化的基本方法

刘枫，王华东，刘培桐：流域非点源污染的量化识别方法及其在于桥水库流域的应用。地理学报，1988，43(4)

(1) 降雨因子：

$$R = \sum_i E_i I_{30}$$

式中，$E_i = (210 + 89\lg I_i) r_i$ 为一次降雨过程中第 i 时段降雨量产生的动能(J·m^{-2})；R 为降雨侵蚀力(100J·cm^{-2}·h)；I_{30} 为一次降雨过程中连续 30min 最大降雨强度(cm·h^{-1})；I_i 为一次降雨过程中第 i 时段的降雨强度(cm·h^{-1})；r_i 为第 i 时段的降雨量(cm)。

(2) 地貌因子：

$$LS = (L/22.1)^m (65.41\sin^2\theta + 4.56\sin\theta + 0.065)$$

式中，L 为坡长(m)；θ 为坡度角；m 为常数。

(3) 植被因子：

$$C = \sum_{i=1}^{5} C_i R_i$$

式中，C_i 为某作物在第 i 个生长期的土壤流失率；R_i 为某作物第 i 个生长期的降雨因子值占全年 R 值的百分数。

长江口泥沙来源分析与数量计算模式

林承坤：长江口泥沙的来源分析与数量计算的研究。地理学报，1989，44(1)

$$\left.\begin{aligned}
&[aa]x_1 + [ab]x_2 + \cdots + [at]x_m = [ay] \\
&[ab]x_2 + [bb]x_2 + \cdots + [bt]x_m = [by] \\
&\quad\vdots \qquad\quad \vdots \qquad\qquad\quad \vdots \qquad\quad \vdots \\
&[at]x_1 + [tb]x_2 + \cdots + [tt]x_m = [ty]
\end{aligned}\right\}$$

式中，$[aa] = \sum_{i=1}^{n} a_i a_i$，$[ab] = \sum_{i=1}^{n} a_i b_i$，其他 [**] 类推；$A$，$B$，…，$T$ 分别代表泥沙补给区，A 补给区泥沙中各种矿物的百分数为 a_1，a_2，…，a_n，B，C，…，T 补给区的矿物百分数分别为 b_1，b_2，…，b_n，C_1，C_2，…，C_n，t_1，t_2，…，t_n；汇合区 y 的各种矿物百分数为 y_1，y_2，…，y_n；x_1 为 A 补给区泥沙汇入 y 处的汇入百分数，x_2 为 B 补给区的汇入百分数，…，x_m 为 T 补给区的汇入百分数；$\sum_{i=1}^{n} a_i = 1.00$，…，$\sum_{i=1}^{n} t_i = 1.00$，$\sum_{i=1}^{n} y_i = 1.00$，$\sum_{i=1}^{m} x_i = 1.00$。

离散线性水文系统模型及其参数估算

王广德：离散线性水文系统模型及其参数估算。地理研究，1989，8(1)

(1) 线性水文系统模型：

$$\left(1-\sum_{i=1}^{p}\alpha_i D_i\right)Q(t)=\left(\sum_{j=0}^{q}\beta_i D_i\right)I(t)$$

(2) 离散线性水文系统模型：

$$\left(1-a_1B-a_2B^2-\cdots-a_pB^p\right)Q(t)=$$

$$\left(b_0+b_1B+\cdots+b_qB^q\right)I(t)$$

式中，$a_1+a_2+\cdots+a_p+b_0+b_1+\cdots+b_q=1.0$，$B$ 为向后平移算子，其余为参数。

(3) 模型参数估算方法：

1) 拉格朗日乘子法：

$$\frac{\alpha L(\beta,\lambda)}{\alpha\beta}=-2A^{\mathrm{T}}Q+2A^{\mathrm{T}}A\beta+\lambda=0$$

$$\frac{\alpha L(\beta,\lambda)}{\alpha\lambda}=-1+\sum_{i=1}^{p}a_i+\sum_{j=1}^{q}b_j=0$$

式中，λ 为拉格朗日乘子。

2) 相关函数法：

$$\overline{\beta}=G^{-1}B$$

式中，$\overline{\beta}=\left[a_1,a_2,\cdots,a_p,b_0,b_1,\cdots,b_q\right]$，

$$B^{\mathrm{T}}=\left[\rho_0(1),\rho_0(2),\cdots,\rho_0(p),\rho_{IQ}(0),\rho_{IQ}(-1),\cdots,\rho_{IQ}(-q)\right]$$

，

$$G=\begin{vmatrix} 1.0 & \rho_0(1) & \cdots & \rho_Q(p-1) & \rho'_{IQ}(1) & \cdots & \rho'_{IQ}(1-q) \\ \rho_0(1) & 1.0 & \cdots & \rho_Q(p-2) & \rho'_{IQ}(2) & \cdots & \rho'_{IQ}(2-q) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \rho_0(p-1) & \rho_0(p-2) & \cdots & 1.0 & \rho'_{IQ}(p) & \cdots & \rho'_{IQ}(p-q) \\ \rho_{IQ}(1) & \rho_{IQ}(2) & \cdots & \rho_{IQ}(p) & 1.0 & \cdots & \rho_1(Q) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \rho_0(1) & \rho_{IQ}(2-q) & \cdots & \rho_{IQ}(p-q) & \rho_1(q) & \cdots & 1.0 \end{vmatrix}$$

3) 线性规划方法：

目标函数：

$$\min\sum_{t=1}^{m}\left|U(t)-V(t)\right)$$

式中，$U(t)-V(t)=e(t)$，$U(t)>0$，$V(t)>0$。

约束条件：

$$U^{\mathrm{T}}-V^{\mathrm{T}}=Q-A\overline{\beta}$$

式中，

$U=\left[u(1),u(2),\cdots,u(m)\right]$，

$V=\left[v(1),v(2),\cdots,v(m)\right]$。

4) 非线性规划方法：

目标函数：

$$\min e^{\mathrm{T}}\cdot e$$

约束条件：

$$Q-A\overline{\beta}=\overline{e}$$

黄土高原小流域特性指标与产沙统计模式

尹国康，陈钦峦：黄土高原小流域特性指标与产沙统计模式．地理学报，1989, 44(1)

(1) 流域地表综合性指标：

$$I=R_{\mathrm{h}}^{0.6}D_{\mathrm{h}}^{0.2}R_{\mathrm{e}}^{-0.5}R_{\mathrm{p}}^{-0.8}R_{\mathrm{s}}^{-0.35}$$

式中，R_{h} 为流域高差比；R_{e} 为流域狭长度；$D_{\mathrm{h}}=Dh$ 为地面崎岖度，D 为流域地面沟壑密度，h 为地面沟壑切割深度；R_{p} 为流域植被度与治理度；R_{s} 为地面岩土抗蚀性因素。

(2) 宏观产沙数学模型：

$$M_{\mathrm{sa}}/M_{\mathrm{wa}}=31.829I^{0.83}$$

式中，M_{wa} 为年径流模量；M_{sa} 为年产沙模量

水网系列水质模型

高维真：苏州水网系列水质模型．地理学报，1989, 44(1)

(1) 网块水质模型：

$$\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}=\frac{W_0}{V}-\frac{Q_{出}}{V}B-K_1B$$

$$\frac{\mathrm{d}O}{\mathrm{d}t}=\frac{M_0}{V}-\frac{Q_{出}}{V}O-K_1B+K_2(O_{\mathrm{s}}-O)$$

式中，B 为 BOD_5 浓度；t 为时间；W_0 为 BOD_5 进入量；V 为网块水体的蓄水量；$Q_{出}$ 为流出网块水体的流量；O 为溶解氧浓度；M_0 为溶解氧入量；O_{s} 为饱和溶解氧浓度；K_1 为耗氧速率常数；K_2 为复氧速率常数。

(2) 分段水质模型：

$$\frac{\partial B}{\partial t}+u\frac{\partial B}{\partial x}-E_x\frac{\partial^2 B}{\partial tx^2}=-(K_1+K_3)B$$

$$\frac{\partial O}{\partial t}+u\frac{\partial O}{\partial x}-E_x\frac{\partial^2 O}{\partial tx^2}=K_2(O_s-O)-K_1B$$

式中，E_x为河网的纵向离散系数；K_3为待定参数。

(3) 河网水质模型：

$$\frac{\partial B}{\partial t}+\frac{\partial UB}{\partial x}=E_x\frac{\partial^2 B}{\partial x^2}-(K_1+K_3)B+L$$

$$\frac{\partial O}{\partial t}+\frac{\partial UO}{\partial x}=E_x\frac{\partial^2 O}{\partial x^2}-K_1B+K_2(O_s-O)+W$$

式中，L为旁侧流入BOD_5沿河附加增率；W为旁侧流入DO沿河附加增率。

尖点型突变模型

曹子舒，朱景郊：突变理论在研究南方丘陵山区水土流失发展过程中的应用——以江西省兴国县为例，自然资源学报，1989，4(2)

$$V(X)=1/4X^4-1/2UX^2+VX$$

式中，一次导数为状态曲面$X^3+UX+V=0$，二次导数为$3X^2+U=0$是状态曲面的奇点集，也就是突变点集；X为状态变量；U和V是控制变量。

水石流平均速度

李昭淑：华山水石流的成因与防止，水土保持通报，1989，9(2)

$$V_c=m_cH_c^{2/3}\times i_c^{1/2}$$

式中，m_c为水石流沟道的糙率系数；H_c为过流断面的泥石流泥深，在狭窄沟床中为水力半径；i_c为泥石流沟床比降。

流域侵蚀产沙和物质转移数学模型

陆中臣：流域侵蚀产沙和物质转移，地理研究，1989，8(2)

1. 沟蚀

(1) 河网密度与侵蚀模数的经验公式：

丘陵沟壑区：

$$W_s=3334.27d_s^{0.945\alpha}$$

$$\alpha=\left(\frac{d_s}{3}\right)^{0.03}$$

高原沟壑区：

$$W_s=59.32d_s^{1.929\alpha}$$

$$\alpha=\left(\frac{2}{d_s}\right)^{0.1}$$

式中，d_s为河网密度；W_s为侵蚀模数。

(2) 输沙率的计算公式：

$$R=Q_0\rho$$

$$\rho=\frac{H\varphi}{2200}\frac{d}{T_0}\left(\frac{V}{V_{HP}}\right)^{3.33}$$

式中，R为输沙率；Q_0为沟道流域闭合断面上的流量；ρ为闭合断面径流浑浊度；d为平均粒径；T_0为闭合断面上的径流深度；V_{HP}为允许不冲流速；V为沟道集水区流域闭合断面上的流速。

(3) 沟蚀估算公式：

$$T_0=\frac{Q_0^{0.375}n^{0.375}}{A^{0.375}I^{0.187}}$$

$$V=A^{-0.25}\frac{Q_0^{0.25}I^{0.375}}{n^{0.75}}$$

式中，$A=\frac{B_0}{T_0}$为常数，B_0为水流宽度。

(4) 沟蚀长度计算公式：

$$L=0.28\frac{HQ_0^{0.667}}{V_P^{2.67}n^2A^{0.67}}$$

式中，H为该地侵蚀基准深度；Q_0为沟壑集水流域闭合断面上的流量；V_P为表征岩石可蚀性的流速，$V_P=1.4V_{HP}$；$n=0.05$为糙率；A为系数，其绝对值第一类岩石取10，第二类岩石取5。

2. 河道泥沙输移数学模型

(1) 一维数学模型：

水流连续方程式：

$$\frac{\partial(BhU)}{\partial x}+B\frac{\partial h}{\partial t}=0$$

水流运动方程式：

$$\frac{\partial U}{\partial t}+U\frac{\partial U}{\partial x}+g\frac{\partial(z+h)}{\partial x}+g\frac{U^2}{C^2R}=0$$

泥沙连续方程式：

$$\frac{\partial(BhU)}{\partial x}+B\frac{\partial(hs)}{\partial t}-\gamma' B\frac{\partial z_0}{\partial t}=0$$

水流挟沙力公式：

$$S_* = S(U, h, \omega, \cdots)$$

河床变形方程式：

$$\gamma' \frac{\partial z}{\partial t} = a\omega(S - S_*)$$

式中，B 为河宽；h、U 为断面平均水深及流速；z 为断面平均河底高程；S、S_* 为断面平均实际含沙量和水流挟沙力；ω 为断面平均泥沙沉速；γ' 为泥沙干容重；g 为重力加速度；C 为谢才系数；R 为水力半径；a 为系数；x、t 为距离及时间。

(2) 二维数学模型：

水流连续方程式：

$$\frac{\partial(Uh)}{\partial x} + B\frac{\partial(Vh)}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0$$

水流运动方程式：

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} + g\frac{\partial(z_0 + h)}{\partial x} +$$

$$g\frac{U\sqrt{U^2 - V^2}}{C^2 h} - \gamma_t\left(\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - \frac{\partial U}{\partial y^2}\right) = 0$$

泥沙连续方程式：

$$\frac{\partial(Uhs)}{\partial x} + \frac{\partial(vhs)}{\partial y} + \frac{\partial(hs)}{\partial t} = -a\omega(S - S_*)$$

水流挟沙力公式：

$$S_* = S_k\left(\overline{U}, h, \omega, \cdots\right), \overline{U} = \sqrt{U^2 + V^2}$$

河床变形方程式：

$$\gamma' \frac{\partial z}{\partial t} = a\omega(S - S_*)$$

式中，h、$\overline{U}$ 为垂线水深及平均流速；U、V 为垂线平均流速在 x、y 方向上的分量；z_0 为点河床高程；S、S_* 为垂线平均实际含沙量和相应水流挟沙力；ω 为垂线平均泥沙沉速；γ' 为涡流黏性系数。

(3) 溯源淤积数学控制方程：

$$\frac{\partial z}{\partial t} - a^2\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 0$$

$$z(x, o) = z_0(x)$$

$$z(o, t) = z_{up}(t)$$

$$z(L, t) = z_{down}(t)$$

$$z(x, o) = z_0(x)$$

$$x \in [0, L], t \in (0, \infty)$$

式中，$a^2 = Aq/\gamma_s$，q 为单宽流量；$A = \gamma_0\gamma/\varphi(\gamma_s - \gamma)$，$\gamma_s$、$\gamma$ 为泥沙和水的容重；φ 为系数；z 为溯源淤积厚度。

水量调控指标

刘昌明：华北平原农业节水与水量调控 地理研究，1989，8(3)

$$C = \frac{R_n}{L(P - R_s)} \approx \frac{PE}{M}$$

式中，C 为区域水分适宜度；R_n 为净太阳辐射；L 为蒸发潜热；P 为降水量；R_s 为径流量；PE 为潜在蒸发；M 为区域土壤湿润度。当 $C>1$ 时，表示干旱，需要灌溉；当 $C<1$ 时，表示潮湿，需要排水。

水资源量及其分布规律模型

杨家坦：福建省水资源分析评价——水资源量及其分布规律 自然资源，1989，3

(1) 闭合流域方程：

$$\overline{R} = \overline{P} - \overline{E}$$

式中，$\overline{R}$ 为多年同步期平均年径流深；$\overline{P}$ 为多年同步期平均年降水深；$\overline{E}$ 为多年同步期平均年陆地蒸发量。

(2) 流域水量平衡年际变化规律模型：

$$C_{V\cdot R} = K\frac{C_{V\cdot P}}{\overline{\alpha}}$$

式中，$C_{V\cdot R}$ 为年径流深变差系数；$C_{V\cdot P}$ 为年降水深变差系数；$\overline{\alpha}$ 为多年同步期平均年径流系数；K 为多年同步期平均年径流均方差与年降水均方差的比值。

(3) 水资源总量模型：

$$W_Z = W_H + W_D - W_C$$

式中，W_Z 为区域水资源总量；W_H 为区域河川径流量；W_D 为区域地下水补给量；W_C 为重复水量。

水流冲刷沉积物生成泥石流的条件及运动规律分析公式

王兆印、张新玉：水流冲刷沉积物生成泥石流的条件及运动规律的试验研究 地理学报，1989，44(3)

(1) 宾汉方程：

$$\tau = \tau_B + \eta \dot{\varepsilon}$$

式中，τ 为剪应力；τ_B 为屈服剪应力；η 为刚度系数；ε 是应变率(等于流速梯度)。

(2) 液相提供的能率：

$$K = \gamma q J$$

式中，γ 为液相容重；K 为单位时间内液相对流动提供的能量；J 为坡降；q 为单宽流量。

自动径流泥沙测站的设计模型

张汉雄，流向阳，郝忠升：宜川自动径流泥沙测站的设计及其应用　水土保持通报，1989，9(4)

1. 设计来水量的确定

设计洪峰流量 Q_m 模型：

$$Q_m = 0.278\alpha hF$$

$$h = \frac{18.1N^{0.301}t}{(t+0.03)^{0.699}}$$

式中，F 为流域集水面积；α 为洪峰径流系数；h 为设计暴雨量，N 为设计暴雨重现期，t 为设计暴雨历时。

2. 过堰流量计算

(1) 三角堰的流量 Q 模型：

$$Q = 1.373\tan\frac{\theta}{2}H^{5/2}$$

式中，θ 为堰顶角；H 为过堰水深。

(2) 梯形堰的流量 Q 模型：

$$Q = 1.86BH^{1.5}$$

式中，B 为梯形堰口底宽；H 为堰上水深。

山区小流域洪水过程中泥沙搬运方式分析公式

丁永建：山区小流域洪水过程中泥沙搬运方式的初步研究　地理学报，1989，44(4)

(1) 在斜坡上泥沙的起动拖曳力：

$$\tau_c = \tau_0 \cos\theta\left(1-\frac{\tan\theta}{\tan\varphi}\right)$$

式中，θ 为沟床纵坡；φ 为泥沙在水下的休止角；$\tau_0 = 0.06(\gamma_s - \gamma_m)D$ 为平底时的起动拖曳力；γ_s 为泥沙容重；γ_m 为浑水容重；D 为欲搬运的泥沙直径。

(2) 沟槽泥沙在水流动力及其自身重力作用下开始运动的临界条件：

$$\frac{h_0}{h} = \frac{\cos\theta[c_*(\gamma_s-\gamma_m)(\tan\varphi/\tan\theta-1)-\gamma_m]}{\gamma_m(1-\cos\theta)}$$

式中，h_0 为水深；h 为沟槽泥沙活动层深度；c_* 为静止泥沙层中固体颗粒的体积浓度；γ_s 为固体颗粒容量；γ_m 为泥石流发生前浑水容重；φ 为泥沙的内摩擦角；θ 为形成区沟床坡度。

(3) 对于矩形或“U”形断面的沟槽，泥石流的容重 γ_f：

$$\gamma_f = \frac{c_*K(\gamma_s-\gamma_m)+\gamma_m(1+K)}{1+K}$$

浅层地下水的天然资源及开采资源的评价模型

肖玉律：四川盆地中部丘陵区浅层地下水资源评价及开发利用　自然资源，1989，5

(1) 地下水天然资源模型：

$$Q_T = Q_G + Q_J$$

式中，Q_T 为天然补给量；Q_G 为水田灌水渗漏补给量；Q_J 为降水入渗补给量。

(2) 地下水开采资源 Q_K 模型：

$$Q_K = Q_0\frac{F}{4R^2}t$$

式中，Q_0 为可布井区段的单井可能出水量；F 为可布井区段面积；R 为抽水井影响半径；t 为按需水季节确定的开采时间。

泥石流阻力分析模型

祁龙：泥石流的阻力分析　水土保持通报，1989，9(6)

(1) 固液两相的划分模型：

$$D_0 = \frac{6\tau_B}{K(\gamma_S-\gamma_f)}$$

式中，D_0 为在大悬浮颗粒粒径，大于 D_0 的颗粒为固相的组成部分，小于 D_0 的颗粒为液相的组成部分；γ_S 为固体颗粒容重；γ_f 为浆体容重；τ_B 为宾汉极限剪切力；K 为系数。

(2) 阻力计算模型：

1) 泥石流阻力 λ 的模型：

$$\lambda = \frac{8gRJ}{V^2}$$

式中，V 为泥石流断面平均流速；R 为水力半径；J 为沟床比降；g 为重力加速度。

2）清水阻力 n' 模型：

$$n' = \frac{H^{1/6}}{9.66 + 19.5\lg \frac{H}{D_{95}}}$$

式中，D_{95} 为河床质代表粒径；H 为水深。

3）推移质运动造成的附加阻力 J_P 模型：

$$J_P = \frac{\gamma_S - \gamma_f}{\gamma_f} \cdot \frac{SD'_{50}}{R} \cdot \tan\alpha$$

式中，S 为推移质在床面上的覆盖率；α 为固体颗粒水下休止角；D'_{50} 为推移质中值粒径。

泥石流冲击力指标

袁锡明：一种泥石流拦砂坝溢流口的防冲设施．水土保持通报，1989，9(6)

$$F = \frac{\gamma_c V_c^2}{g} \cdot \sin^2\alpha$$

式中，γ_c 为泥石流的容重；V_c 为泥石流的流速；g 为重力加速度；α 为冲击力方向与受力方向的夹角。

泥石流流量指标

蔡祥兴，李鸿琏，崔炳田：马槽沟泥石流防治工程初探．水土保持通报，1989，9(6)

$$Q_M = Q_F(1+\phi)D_0$$

式中，Q_F 为洪水量；ϕ 和 D_0 分别为泥石流系数和堵塞系数。

简化的积雪场硫酸盐模型

Bobba A G，Lam D C L：加拿大的酸化流域的水文学模拟．Ecological Modelling，1990，50

$$\frac{d(VC)}{dt} = \alpha(t) - mC_m A$$

$$\alpha(t) = \sigma C_d A + PC_w A$$

式中，V 是积雪场的容积；C 是积雪场中硫酸盐的浓度；σ 是干沉积率；C_d 是干沉积浓度；A 是流域面积；P 是降水率；C_w 是降水浓度；m 是融化率；C_m 是融水的浓度。

经验特征函数法

沈健，王宝灿：长江河口区平均海面季节性变化的分析．地理学报，1990，45(4)

$$\eta(x_i,t) = \bar{\eta}(x_i,t) + \sum_{k=1}^{N} c_k(t)e_k(x_i)(\lambda_k n_x n_t)^{1/2}$$

式中，n_x 和 n_t 分别为测站总数和总观测时间；$i=1,2,\cdots,n_x$；$i=1,2,\cdots,n_x$；$\eta(x_i,t)$ 为某验潮站 x_i 在时刻 t 的月平均海面；$c_k(t)$ 为时间特征函数；$e_k(x_i)$ 为空间特征函数；λ_k 为第 k 个特征值；N 为特征函数的个数；$\bar{\eta}(x_i,t)$ 为 x_i 测站多年平均海面。

冲积平原盐碱低洼地治理模式

秦浩：黄淮海冲积平原盐碱低洼地治理模式——以禹城县北丘洼为例．地理研究，1990，9(1)

（1）确定影响潜水井的影响半径公式：

$$R = 2S\sqrt{HK}$$

式中，S 为井中的水位降深；H 为无压含水层的厚度；K 为含水层的渗透系数。

（2）单井涌水量的推算公式：

1）巴布什金近似公式：

$$Q = 1.36KS\left(\frac{L+S}{\lg\frac{R}{r}} + \frac{L}{\lg\frac{0.66L}{r}}\right)$$

式中，L 为过滤器有效部分长度或井的有效渗透部分的长度；R 为影响半径；r 为单井过滤器的半径。

2）经验公式：

$$Q_{Hec} = Q_{COB}\sqrt{\frac{1}{ha}}\sqrt{\frac{2ha-1}{ha}} = \frac{1.36(Ha^2 - ha^2)}{\lg R - \lg r}\sqrt{\frac{1}{ha}}\sqrt{\frac{2ha-1}{ha}}$$

式中，Q_{COB} 为完整井的涌水量；ha 为当抽水达到有效带的界线时，自井水中水位的含水层的厚度。

（3）地下水的调节储量：

$$Q_P = \sum M_B W_P$$

式中，Q_P 为调节储量；M_B 为给水系数；W_P 为在地下水具有自由表面的地段上，高低水位之间含水层所占的体积。

流体力学方程组

谢学纲：流体的角动量平衡方程-对流体力学方程组的新建议．地理研究，1990，9(1)

（1）角动量定律：

$$\frac{dG}{dt}=L$$

式中，G 为小质元在其质心系中相当于质心的角动量；L 为相对于质心的力矩。

(2) 流体的角动量平衡方程：

$$\frac{d\omega}{dt}=\frac{5\eta}{R_0^2}(-2\omega+\nabla\times V)$$

式中，$\eta=\frac{\mu}{\rho}$ 为运动黏滞系数，μ 为切变黏滞系数，ρ 为流体密度；R_0 为小质元半径；ω 为转动角速度矢量；V 为速度。

(3) 流体的动量平衡方程：

$$\frac{dV}{dt}=-\frac{1}{\rho}\Delta\cdot P^T+F=$$

$$-\frac{1}{\rho}\nabla P+\eta'\ -\frac{2}{3}\eta'\ \nabla(\nabla\cdot V)+$$

$$2\eta\nabla^2V+2\eta\nabla\times\omega+F$$

式中，F 为单位质量的流体受到的外力；$\eta'=\frac{\mu'}{\rho}$。

小流域水土流失量模型

肖永全，王恒善：黄土高原沟壑区的水土流失及其经验计算模式．水土保持通报，1990，10(5)

$$M=B_0+\sum_{i=1}^{n}B_iX_i\quad i=1,2,3,4$$

式中，M 为产流、产沙模数；B 为待定系数；X_i 分别为总雨量、降雨历时、平均雨强和天气类型。

GM(1,1)模型

郭锐，王愚昌：应用灰色系统动态模型群分析泾河流域减沙效益。水土保持通报，1991，11(1)

$$X_{(k+1)}^{(1)}=\left(X_{(1)}^{(0)}-\frac{u}{a}\right)e^{-ak}-\frac{u}{a}$$

天山中段及祁连山东段河流的径流量模型

王宗太：天山中段及祁连山东段小冰期以来的冰川及环境．地理学报，1991，46(2)

$$Q=Q_P+Q_I+Q_g$$

式中，Q_P 为大气降水径流(包括季节雪融水)；Q_I 为冰川融水径流；Q_g 为地下水(基流)。

降雨量与降雨强度测定模型

陈文亮，王占礼：人工模拟降雨特性的试验研究．水土保持通报，1991，11(2)

(1) 降雨强度的测定：

平均降雨强度 $\bar{I}_P$ 模型：

$$\bar{I}_P=\frac{\bar{H}_P}{t}$$

式中，$\bar{H}_P$ 为散水面上的平均降雨量；t 为降雨时间。

(2) 降雨分布的均匀性：

均匀系数 K 模型：

$$K=1-\frac{D}{\bar{H}}$$

$$D=\frac{\sum\left|H_i-\bar{H}\right|}{n}$$

式中，$\bar{H}$ 为降雨面上的平均降雨量；H_i 为降雨面上的测点雨量；n 为降雨面上的雨量测点总数。

(3) 雨滴直径大小和分配：

1) 雨滴 d 直径模型：

$$d=\sqrt[3]{\frac{3D^2h}{2}}$$

式中，D 为滤纸色斑直径；h 为滤纸的厚度。

2) 天然降雨分配模型：

$$F=1-e^{\left(\frac{d_k}{a}\right)^n}$$

$$a=1.30I^{0.232}$$

式中，F 为雨滴直径小于或等于 d_k 的雨滴体积累积百分数；d_k 为雨滴直径；n 为雨型常数；a 为与降雨强度相关的常数；I 为降雨强度。

(4) 雨滴降落终点速度：

1) 任意高度的雨滴降落速度 V_k 模型：

$$V_k=\sqrt{V_k'^2\left(1-e^{-\frac{2g}{V'^2}\cdot h}\right)}$$

式中，V_k' 为雨滴的终点速度；h 为雨滴的降落高度；g 为重力加速度。

2) 雨滴终点速度 V_t 模型：

$$V_t=\sqrt{\frac{4Wd^3}{3C_Dd_1^2\rho}}$$

式中，W 为水的重率；d_1 为雨滴在最终形状的直径；d 为雨滴直径；ρ 为空气的密度；C_D 为阻力系数。

水体对湍流交换系数影响的计算公式

王浩，傅抱璞：水体对湍流交换系数的影响．地理研究，1991，10(3)

(1) 基本方程组：

$$\frac{\partial u}{\partial t}=-u\frac{\partial u}{\partial x}-w\frac{\partial u}{\partial z}+f(v-v_g)-f^*w-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p'}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(K_H^M\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_H^M\frac{\partial u}{\partial z}\right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}=-u\frac{\partial v}{\partial x}-w\frac{\partial v}{\partial z}+f(u-u_g)+\frac{\partial}{\partial x}\left(K_H^M\frac{\partial v}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_H^M\frac{\partial v}{\partial z}\right)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}=-u\frac{\partial w}{\partial x}-w\frac{\partial w}{\partial z}+f^*u-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p'}{\partial z}+\frac{\theta'}{\theta}g+\frac{\partial}{\partial x}\left(K_H^M\frac{\partial v}{\partial z}\right)$$

$$0=\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(K_H^H\frac{\partial \theta}{\partial z}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_Z^H\frac{\partial \theta}{\partial z}\right)-\frac{1}{C_P\rho}\frac{\partial R_L}{\partial z}$$

$$\frac{\partial s}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(K_H^H\frac{\partial s}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_Z^H\frac{\partial s}{\partial z}\right)$$

式中，u，v，w 分别为风速在 x，y，z 方向上的三个分量；θ、s 为空气的位温和比湿；ρ 为空气密度；f 和 f^* 为柯氏参数；u_g 和 v_g 为地转风分量；p' 为气压扰动；K 为湍流交换系数；上标 M 和 H 分别表示动量和热量；下标 H 和 Z 分别表示水平方向和铅直方向。

(2) 湍流交换系数：

1) 稳定度和风应力的函数：

$$K_Z^M=\begin{cases} l^2\left|\frac{\partial V}{\partial z}\right|(1+\alpha R_i)^2 & (R_i<0)\\ l^2\left|\frac{\partial V}{\partial z}\right|(1-\alpha R_i)^2 & (R_i\geq 0)\end{cases}$$

式中，$R_i=\frac{g}{\theta}\frac{\frac{\partial\theta}{\partial z}}{\left|\frac{\partial V}{\partial z}\right|^2}$；$l=\frac{k_0(z+z_0)}{1+\frac{k_0(z+z_0)}{\lambda}}$；$K_Z^M$ 为稳定度和风应力的函数；$\alpha=-3$ 为参数；R_i 为 Richarson 数；g 为重力加速度；k_0 为卡门常数；$\lambda=0.00027|V_g|f^{-1}$；$z_0=0.032u_*^2/g$ 为表面粗糙长度，u_* 为摩擦速度。

2) 铅直热量湍流交换系数：

$$K_Z^H=\begin{cases}1.35K_Z^M & (R_i<R_{ic}=0.25)\\ K_Z^M & (R_i\geq R_{ic})\end{cases}$$

式中，R_{ic} 为临界 Richarson 数

3) 表面摩擦速度、摩擦位温和摩擦比湿计算公式：

$$\begin{cases}u_*=k_0\left(u_1^2+v_1^2\right)^{1/2}/[\ln(z/z_0)-\psi_1]\\ \theta_*=k_0[\theta_1-\theta(z_0)]/0.74[\ln(z/z_0)-\psi_2]\\ q_*=k_0[s_1-s(z_0)]/0.74[\ln(z/z_0)-\psi_2]\end{cases}$$

其中

$$\psi_1=\begin{cases}2\ln[(1+\phi_m^{-1})/2]+\ln[(1+\phi_m^{-2})/2]-\\ 2\arctan\phi_m^{-1}+1.571 & (\zeta\leq 0)\\ 4.7\zeta & (\zeta>0)\end{cases}$$

$$\psi_2=\begin{cases}2\ln[(1+0.74\phi_H^{-1})/2] & (\zeta\leq 0)\\ -6.25\zeta & (\zeta>0)\end{cases}$$

式中，u_* 为表面摩擦速度；θ_* 为摩擦位温；q_* 为摩擦比湿；$\zeta=\frac{z}{L}$，L 为莫宁-奥布赫夫长度，$L=\theta U_*^2/k_0 g\theta_*$。

溅蚀总量的预报方程

吴普特，周佩华：地表坡度对雨滴溅蚀的影响．水土保持通报，1991，11(3)

$$S_T=5.985(EI)^{0.544}S^{0.471}$$
$$r=0.873,\ F=34.96$$

式中，S_T 为单位面积上的溅蚀总量；E 为雨滴动能；I 为降雨强度；S 为地表坡度。

水量平衡模型

傅国斌，刘昌明：全球变暖对区域水资源影响的计算分析．地理学报，1991，46(3)

$$P = E_a + R + dS_m$$

式中，P 为流域平均雨量；E_a 是流域实际的总蒸散量；R 是径流量；dS_m 是时段始末流域蓄水量的变化（$dS_m > 0$ 表示流域蓄水增加，$dS_m < 0$ 表示流域蓄水减少．流域蓄水量的变化主要是土壤含水量的变化）。

GM(1,1)模型的时间函数

朱湖根，王大齐：巢湖泥沙淤积预测与防治。水土保持通报，1991，11(4)

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{u}{a}\right]e^{-ak} + \frac{u}{a}$$

西北内陆平原水资源分析模型

范锡朋：西北内陆平原水资源开发引起的区域水文效应及其对环境的影响。地理学报，1991，46(4)

(1) 封闭的内陆河系水资源的数量指标：

$$Q_T = (Q_{RT} - Q_{RG}) + (Q_{GT} - Q_{GR})$$

式中，Q_T 为陆地总水资源；Q_{RT} 为河川径流量；Q_{RG} 为排入河中的地下径流；Q_{GT} 为地下水补给量；Q_{GR} 为来自河水(或引入渠系、田间后)的入渗补给量。

(2) 内陆平原河流-含水层系统的绿洲水资源表达式：

$$Q_N = \left(Q_{T'} + \frac{\Delta V}{\Delta t}\right) - (Q_F + E_R)$$

式中，Q_N 为天然绿洲生态系统可耗水量；$Q_{T'}$ 为河流-含水层系统的总水资源；$\Delta V / \Delta t$ 为允许消耗的地下水储存量；Q_F 为人工绿洲生态系统总耗水量；E_R 为未入渠地表水的蒸发消耗量。

小流域综合治理经济效益分析模型

宋树华：朱湾河小流域综合治理效益浅析。水土保持通报，1991，11(4)

1．静态经济分析：

投资回收年限 T_D 模型：

$$T_D = \frac{K}{B_N - C_N}$$

式中，K 为治理投资；B_N 为平均年水保效益；C_N 为平均年运行费。

2．动态经济分析：

(1) 投资折算总值 K 模型：

$$K = \sum_1^m K_i'(1+r)^{T_i}$$

式中，K_i' 为基准点之前 T_i 年的工程投资额；r 为经济报酬率；m 为基准点之前工程投资的年限；T_i 为基准点之前第 T_i 年，$T_i = m$。

(2) 运行费用的折算总值 C 模型：

$$C = \sum_1^n C_j(1+r)^{-T_j}$$

式中，C_j 为基准点之后第 T_j 年的年运行费用；r 为经济报酬率；n 为基准点之前工程投资的年限；T_j 为基准点之后第 T_j 年，$T_j = n$。

(3) 效益的折算总值 B 模型：

$$B = \sum_1^n B_j(1+r)^{-T_j}$$

式中，B_j 为基准点之后第 T_j 年的年效益。

(4) 投资回收年限 T_D 模型：

$$T_D = \frac{-\lg\left(1 - \frac{kr}{B_N - C_N}\right)}{\lg(1+r)}$$

(5) 内部回收率 r_0 模型：

$$r_0 = \frac{1}{\left[\frac{K+C}{(n+1)B_j}\right]^{\frac{1}{n}}} - 1$$

蓄水效率模型

陈法扬，王志明，傅青增：小良水土保持试验站综合治理效益分析．水土保持通报，1992，12(1)

$$\eta_1 = 1 - \frac{\alpha'}{\alpha_3}$$

$$\alpha' = \frac{F_g}{F}\alpha_3 + \frac{F_c}{F}\alpha_2 + \frac{F_z}{F}\alpha_1$$

式中，α' 为治理后多年平均径流系数；α_3 为光板地试验区多年平均径流系数；α_2 为纯桉林试验区多年平均径流系数；α_1 为混交林试验区多年平均径流系数；F_g 为光板地、房屋、道路用地；F_c 为纯林地面积；F_z 为综合措施面积；F 为全站面积。

流域滞时关系式

靳长兴：变动流域滞时方程．地理研究，1992，11(2)

$$t_L = CL_{ca}/V$$

式中，t_L为流域滞时；C为系数；L_{ca}为重心长度；V为汇流速度．

泥沙起动条件与卵石浅滩航道整治线宽度的计算公式

钟恩清：泥沙起动条件与卵石浅滩航道整治线宽度的确定．地理研究，1992，11(2)

(1) 无黏性泥沙的起动拖曳力计算公式：

$$\tau_c/(\gamma_s-\gamma)d = f(u_* d/v)$$

式中，τ_c为泥沙起动拖曳力；d为泥沙粒径；γ_s和γ分别为泥沙和水的容重；u_*为摩阻流速；v为水的运动黏滞系数．

(2) 泥沙起动流速计算公式：

1) 张瑞瑾公式：

$$U_c = \left(\frac{h}{d}\right)^{0.14}\left(17.6\frac{\gamma_s-\gamma}{\gamma}+0.000\,000\,605\frac{10+h}{d^{0.72}}\right)$$

式中，U_c为临界水流条件下的垂线平均流速；h为水深。

2) 唐成本公式：

$$U_c = 1.79\frac{1}{1+m}\left(\frac{h}{d}\right)^m\left[\frac{\gamma_s-\gamma}{\gamma}gd+\left(\frac{\gamma'}{\gamma'_c}\right)^{10}\frac{c}{\rho d}\right]^{1/2}$$

式中，γ'和γ'_c分别为泥沙干容重和稳定干容重；g为重力加速度；ρ为水的密度；c为粘结力系数．

3) 窦国仁公式：

$$U_c = 0.32\left(\ln\frac{11h}{K_s}\right)\left(\frac{\gamma_s-\gamma}{\gamma}gd+0.19\frac{gh\delta+\varepsilon_k}{d}\right)^{1/2}$$

式中，K_s为河床粗糙度；ε_k为粘结力系数；δ为与沙粒缝隙大小有关的特征厚度。

4) 沙玉清公式：

$$U_c = \left[266\left(\frac{\delta}{d}\right)^{1/4}+6.66\times10^9(0.7-\varepsilon)^4\left(\frac{\delta}{d}\right)^2\right]^{1/2}\times\sqrt{\frac{\gamma_s-\gamma}{\gamma}gd}\,h^{1/5}$$

式中，δ为薄膜水厚度；ε为孔隙率．

(3) 拖曳力计算公式：

$$\tau = \gamma hJ$$

式中，τ为水流作用于床面卵石的拖曳力；h为浅滩整治后整治水位时的断面平均水深；J为整治后整治水位时的比降．

(4) 卵石浅滩整治线宽度计算公式：

$$B = Q/A\left(0.06\frac{\gamma_s-\gamma}{\gamma}\right)^{1/2}h^{7/6}d^{1/3}$$

式中，B为卵石浅滩整治线宽度；Q为整治水位时通过的流量；A为系数；d为卵石粒径。

区域地下水系统模型

孙云伟，李砚阁：区域地下水系统过程识别．地理研究，1992，10(2)

(1) 区域地下水系统数值模型：

$$[s]_e\begin{bmatrix}\frac{dh_i}{dt}\\ \frac{dh_j}{dt}\\ \frac{dh_k}{dt}\end{bmatrix} = -[T]_e\begin{bmatrix}h_i\\ h_j\\ h_k\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}F_i\\ F_j\\ F_k\end{bmatrix}$$

$$\frac{dH}{dt} = AH+BU$$

式中，H为各节点水头组成的矩阵；U为各单元源汇项组成的矩阵；A，B为系数矩阵．

(2) 地下水系数离散型状态转移方程：

$$H(k+1) = AH(K)+BQ(k)$$

式中，$H(K)$为地下水头向量；$Q(k)$为开采向量；A，B为系数矩阵．

(3) 地下水位降深相应函数的离散形式：

$$S(k,n) = \sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}\beta(k,j,n-i+1)\,Q(j,i)$$

式中，$S(k,n)$为第k井第n时段的水位降深；$\beta(k,j,n-i+1)$为第j井从第i时段的单位脉冲对第k井第n时段的平均降深；$Q(j,i)$为第j井第i时段的平均开采量；m为井数；n为时段数．

(4) 地下水水量平衡方程：

$$F_iU_i\frac{dx_i}{dt} = \sum_{j\neq1}^{n}k_{ij}b_{ij}M_{ij}\frac{x_j-x_i}{l_{ij}}-Q_i+\overline{Q}_i$$

式中，F_i 为第 i 单元的面积；U_i 为第 i 单元的给水度；x_i 为第 i 单元的地下水头；t 为时间；k_{ij} 为 i 单元与 j 单元之间的渗透系数；b_{ij} 为 i 单元与 j 单元之间的宽度；M_{ij} 为 i 单元与 j 单元之间的含水层厚度；Q_i 为 i 单元的开采量；$\overline{Q}_i$ 为 i 单元的其他源汇项。

(5) 地下水系统的形式模型：

$$\frac{dX}{dt} = AX + BQ + C$$

或者

$$X(k+1) = AX(k) + BQ(k) + C$$

式中，$X = [x_1 x_2 x_3 \cdots x_n]^T$；$Q = [Q_1 Q_2 Q_3 \cdots Q_n]^T$；

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix};\ B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_4 \end{bmatrix};\ C = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_4 \end{bmatrix}。$$

(6) 地下水系统参数辨识方法-最小二乘法：

$$V = \sum_1^m e^2(k) = \sum_1^m \left[h(k+1) - \sum_{i=1}^n a_i h_i(k) - bQ(k) - c \right]^2$$

式中，V 为损耗系数；最小二乘法就是使 V 值达到最小，从而求得 a_1，a_2，a_n，b，c。

森林土壤涵蓄的水量模型

邓世宗：从广西森林水文的研究谈柳江流域洪水的治理。自然资源，1992，2

(1) 森林涵蓄水量 w_f 模型：

$$w_f = w_o + w_m + w_u + w_s$$

式中，w_o 为林冠层涵蓄的水量；w_m 为灌草层涵蓄的水量；w_u 为枯枝落叶层涵蓄的水量；w_s 为土壤层涵蓄的水量。

(2) 森林消耗的雨量 w_e 模型：

$$w_e = w_f + p(i_c\% + i_{cm}\%) - (w_o + w_m)$$

式中，$i_c\%$ 为林冠截留率；$i_{cm}\%$ 为草本层截留率；w_m 为草本层涵蓄量。

雨滴击溅在薄层水流侵蚀中的作用模型

吴普特，周佩华：雨滴击溅在薄层水流侵蚀中的作用。水土保持通报，1992，12(4)

(1) 土壤抗剪力 τ_S 模型：

$$\tau_S = c + \sigma \tan\beta$$

式中，c 为土壤黏结力；σ 为土壤承受的正压力；β 为土壤内摩擦角。

(2) 雨滴作用侵蚀量 S_{Rd} 模型：

$$S_{Rd} = S_F - S_R$$

式中，S_F 为总侵蚀量；S_R 为径流作用侵蚀量。

稳定渠道几何形态解析模型

孙志林：稳定渠道几何形态解析。地理研究，1992，11(4)

(1) 外力平衡方程：

$$F^2 + (W\sin\theta)^2 = (w\cos\theta f)^2$$

$$w = \alpha_1(r_s - r)D^s$$

$$F = \alpha_2 D^2 \tau_0$$

$$\tau_0 = rhj\sin\alpha = rhj$$

式中，f 为泥沙静摩擦系数；θ 为渠道边坡倾角；W 为泥沙颗粒水下重量；F 为水流方向上作用于颗粒的当地水流作用力；τ_0 为当地水流切应力；α 为流动方向与水平面的交角。

(2) 稳定渠道断面曲线分析解：

$$\frac{x}{H_0} = \frac{1}{f}\left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} P_n(f)\right]\arccos\eta - \frac{1}{f}\sum_{n=1}^{\infty} P_n(f)\left[1 + \sum_{m=1}^{n-1}\frac{(2m)!!}{(2m+1)!!}\eta^{2m}\right]\eta\sqrt{1-\eta^2}$$

式中，$P_n(f) = \frac{(-1)^n}{2n-1}\left[f^n \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!}\right]^2$。

(3) 稳定渠道水面宽度计算公式：

$$\frac{B}{H_C} = F(f) = \frac{\pi}{f}\left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} P_n(f)\right]$$

(4) 过水面积计算公式：

$$A = \frac{2H_C^2}{f}\int_0^1 \sqrt{\frac{1+(f\eta)^2}{1-\eta^2}}\,\eta d\eta = \left(\cot\phi + \csc^2\phi\right)H_C^2$$

式中，A 为过水面积。

(5) 湿周计算公式：

$$P = 2\int_s \mathrm{d}s = -2\int_1^0 \sqrt{1+\frac{1+(f\eta)^2}{f^2\left(1-\eta^2\right)}}\mathrm{d}\eta = \frac{\pi}{\sin\phi}H_C$$

式中，P 为湿周。

(6) 河相关系的理论表达式：

$$H_C = \left[\frac{\pi^4\sin^6\phi}{(\cos\phi+\phi\csc\phi)^{10}}\right]^{1/13}\left[\left(\frac{Q}{KU_{*C}}\right)D\right]^{1/13}$$

$$J = \left[\frac{(\cos\phi+\phi\csc\phi)^{10}}{\pi^4\sin^6\phi}\right]^{1/13}\frac{U_{*C}^2}{gD}\left(\frac{KU_{*C}D^2}{Q}\right)^{6/13}$$

$$B = F(f)\left[\frac{\pi^4\sin^6\phi}{(\cos\phi+\phi\csc\phi)^{10}}\right]^{1/13}\left[\left(\frac{Q}{KU_*}\right)^6 D\right]^{1/13}$$

$$A = \left[\frac{\pi^8}{(\cos\phi+\phi\csc\phi)^7\sin\phi}\right]^{1/13}\left[\left(\frac{Q}{KU_{*C}}\right)^6 D\right]^{2/13}$$

$$P = \left[\frac{\pi^{17}}{(\cos\phi+\phi\csc\phi)^7\sin^7\phi}\right]^{1/13}\left[\left(\frac{Q}{KU_*}\right)^6 D\right]^{1/13}$$

$$V = \left[\frac{(\cos\phi+\phi\csc\phi)^7\sin\phi}{\pi^8}\right]^{1/13}\left[\frac{(KU_{*C})^{12}Q}{D^2}\right]^{1/13}$$

式中，$\phi = 0.567 + 0.0222D$ ，D 为粒径；K 为反映床面的阻力特性的系数。

(7) Egiazaroff 公式：

$$\frac{\tau_c}{(r_s - r)D_{25}} = 0.1[\lg 19(D_{25}/D)]$$

式中，τ_c 为起动切应力。

(8) 稳定渠道断面曲线表达式：

抛物线型断面：

$$\begin{cases} B = 4H_C\cot\phi \\ X = 2H_C\cot\phi\sqrt{1-\eta} \end{cases}$$

余弦曲线型断面：

$$\begin{cases} B = \pi H_C\cot\phi \\ X = 2H_C\cot\phi\cos^{-1}\eta \end{cases}$$

削减洪峰效率计算模型

于成武，李敦树，毕子珠：房千小流域综合治理减洪效益分析．水土保持通报，1992，12(4)

(1) 洪峰流量 θ_m 推算模型：

$$\theta_m = \frac{1}{n}FR^{\frac{2}{3}}I^{\frac{1}{2}}$$

式中，F 为过水断面面积；R 为水力半径；I 为水面比降。

(2) 削减洪峰效率 η 模型：

$$\eta = \left(1-\frac{\theta_{mH}}{\theta_{mQ}}\right)\times 100\%$$

$$\frac{\theta_{mH}}{\theta_{mQ}} = \left(1-\frac{\Delta R_m}{R_m}\right)^{\frac{4}{3}}$$

式中，θ_{mQ},θ_{mH} 分别为治理前、后的洪峰流量；ΔR_m 为治理后水保措施拦截洪峰平均径流深；R_m 为治理前径流深。

中国西部降水资源的不稳定性模型

李栋梁，彭素琴：中国西部降水资源的不稳定性．自然资源，1992，5

(1) 历年降水距平百分率 R_i' 模型：

$$R_i' = \frac{R_i - \overline{R}}{\overline{R}}\times 100\%$$

$$\overline{R} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}R_i$$

式中，n 为样本长度；R_i,$\overline{R}$ 分别为历年月总降水量序列及该月多年平均降水量。

(2) 月降水量的多年平均距平百分率 K_1 模型：

$$K_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left|R_i - \overline{R}\right|}{n\overline{R}}$$

(3) 平均年际变化率 K_2 及变差系数 C_v 模型：

$$K_2 = \frac{\sum_{i=2}^{n}\left|R_i - R_{i-1}\right|}{(n-1)\overline{R}}$$

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(R_i - \overline{R})^2}}{\overline{R}}$$

(4) 月降水量的平均偏度系数 g_1 和峰度系数 g_2 模型：

$$g_1 = \frac{m_3}{m_2^{3/2}}$$

$$g_2 = \frac{m_4}{m_2^{2}}$$

$$m_k = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(R_i - \overline{R})^k$$

$$k = 2,3,4$$

式中，m_2，m_3，m_4 分别为二阶、三阶和四阶中心距。

系统动力学模型

陆洪斌，孙荣杰等：宁安县应用系统动力学模型制定水土保持规划。水土保持通报，1993，13(1)

(1) 水土保持规划动态仿真——状态方程：

$$\frac{dx}{dt} = f(R_i, A_i, X_i, P_i) = R$$

(2) 仿真分析

1) 功效系数 d_i 模型：

$$d_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^{n} A_{ij}}$$

$$(j = 1,2,\cdots,n)$$

式中，A_{ij} 为各目标的评价函数；n 为评审因子数。

2) 总体功效系数 D 模型：

$$D = \sum_{i=1}^{m}\alpha_i d_i \quad (i = 1,2,\cdots,m)$$

式中，α_i 为各评审目标的权系数；m 为评审目标数。

水资源利用综合效益评价模型

刘绍民，冯秀藻：新疆塔里木河沿岸地区2000年水资源优化分配。自然资源学报，1993，8(1)

首先决策者通过元素的两两比较重要性，用三标度法可得比较矩阵：

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \cdots & C_{nn} \end{bmatrix}$$

式中，$C_{ij} = \begin{cases} 2 & \text{第}i\text{元素比第}j\text{元素重要} \\ 1 & \text{第}i\text{元素与第}j\text{元素同等重要} \\ 0 & \text{第}i\text{元素不如第}j\text{元素重要} \end{cases}$，$C_{ii} = 1$ 即元素自身比较重要性相同。

然后由比较矩阵推出判断矩阵：

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix}$$

式中，$b_{ij} = \begin{cases} \frac{r_i - r_j}{r_{max} - r_{min}}(b_m - 1) + 1 & (r_i > r_j) \\ 1 & (r_{max} = r_{min}) \\ \left[\frac{r_j - r_i}{r_{max} - r_{min}}(b_m - 1) + 1\right]^{-1} & (r_i < r_j) \end{cases}$，

$b_m = r_{max}/r_{min}$，$r_i = \sum_{j=1}^{n} C_{ij}$ $(i = 1,\cdots,n)$，$r_{max} = \max_i(r_i)$，$r_{min} = \min_i(r_i)$。

通过计算模型中对于上一层次某元素而言本层次与之与联系的元素的重要性次序的权值便可以得出塔里木河沿岸地区各用水户的综合效益系数。

水面蒸发、温度和湿度计算公式

洪嘉琏，傅国斌：一种新的水面蒸发计算方法。地理研究，1993，12(2)

(1) 水面蒸发计算公式：

1) 湍流热通量计算公式：

$$H_0 = C_p\rho\left(K_n\frac{\partial T}{\partial Z}\right)_{z=0} = C_p\rho D_H(T_0 - T_{1.5})$$

式中，H_0 为湍流热通量；ρ 为空气密度；C_p 为空气定压比热；K_n 为热量的湍流交换系数；D_H 为热量的分子扩散速度；T_0 为水面温度；$T_{1.5}$ 为水面上 1.5m 高度处的温度。

$$D_H = D_{H自} + D_{H强}$$

式中，$D_{H自} = 2.772\times10^{-6}\left(\frac{gx^3\Delta T}{\nu^2 T_K}\right)^{3/1}/x$，$D_{H强} = 5.407\times10^{-7}\left(\frac{u_{1.5}x}{\nu}\right)^{0.8}/x$，“自”表示自由对流项，“强”

表示强迫对流项；ΔT 为水面温度与气温之差，x 为水面平均宽度，v 为动力黏滞系数；T_k 为绝对温度，$u_{1.5}$ 为 1.5m 高度处的风速。

2）水汽通量计算公式：

$$E_0=\rho\left(K_m\frac{\partial q}{\partial z}\right)_{z=0}=\rho D_W(q_0-q_{1.5})=$$

$$\frac{0.622\rho}{xp}(A+B)\ (e_0-e_{1.5})$$

式中，$A=2.772\times10^{-6}\left(\frac{gx^3\Delta T}{v^2T_k}\right)^{3/1}$

$$B=5.407\times10^{-7}\left(\frac{u_{1.5}x}{v}\right)^{0.8}$$

E_0 为湍流热通量；K_m 为水汽的湍流交换系数；D_W 为水汽的分子扩散速度；q_0 为水面比湿；$q_{1.5}$ 为水面上 1.5m 高度处的比湿；p 为气压；$e_0-e_{1.5}$ 为水汽压差。

(2) 水面温度和湿度订正公式：

1）温度订正公式：

$$T_n=T_0-0.3℃$$

式中，T_n 为订正后水面温度；T_0 为水面温度。

2）温度订正：

$$\Delta T_v=(373.2+T_n)\ (1+0.378e_n/p)-(273.2+T_{1.5})\ (1+0.378e_{1.5}/P)$$

式中，ΔT_v 为水-气虚温差；e_n 为在水面温度 T_n 时的饱和水汽压。

小流域降雨对土壤侵蚀模型

钟朝章，王伟文，王胜华等：乌陵河小流域降雨对土壤侵蚀的影响。水土保持通报，1993，13(2)

(1) 降雨侵蚀力：

雨滴对土壤表面的打击动能 E_0 模型：

$$E_0=\frac{r_w S_0 V_0^2}{2g}$$

式中，r_w 为水密度；V_0 为雨滴下落终速；g 为重力加速度。

(2) 面蚀、沟蚀、崩岗侵蚀：

1）弗劳德数 F_r 模型：

$$F_r=\frac{v}{(gR)^{\frac{1}{2}}}$$

式中，v 为地表径流速度；R 为水半径；g 为重力加速度。

2）沟岸安全临界高度 H_c 模型：

$$H_c=N_s c/r_d$$

式中，N_s 为依崩壁倾角和土壤内摩擦角而定的数；c 为土壤内聚力；r_d 为土壤容重。

浮游植物光合生产力模拟

刘乃壮等：我国淡水水域光合产物的气候生产力探讨。自然资源学报，1993，8(2)

(1) Talling 等给出的浮游植物日光合生产量方程(单位水面水柱的光合生产量)：

$$P_D=\frac{B_c P_m}{K_d}\left[\ln\frac{E_d(0)}{0.5\cdot E_k}\right]N$$

式中，P_D 为浮游植物日光合生产量，单位为($mg\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$)；$B_c$ 为浮游植物浓度($mg\cdot chla\cdot m^{-3}$)；P_m 为浮游植物单位浓度、单位时间的最大光合率($mg\cdot mg^{-1}$，$chla\cdot h$)；N 为一天内的实际日照时数；K_d 为水内光合有效辐射的垂直消光系数(m^{-1})；E_k 为浮游植物的光饱和时点辐照值($W\cdot m^{-2}$)。

(2) 年光合生产力估算：

取春分(3 月 21 日)、夏至(6 月 22 日)、秋分(9 月 23 日)、冬至(12 月 22 日)4 个节气日与适温下的日光合生产量代表各地不同季节的平均生产水平，对各季节的日生产量(P_{Di})加权求和，为它们的年光合生产力 $P_Y(R)$，即：

$$P_Y(R)=\sum_{i=1}^{n}P_{Di}D$$

式中，n 为生长季包含的季节数，寒温带为 2，温带至热带为 4；D 为天数。

浮游植物气候生产力模拟

刘乃壮等：我国淡水水域光合产物的气候生产力探讨。自然资源学报，1993，8(2)

光合作用与环境的光、热、水、二氧化碳等因子有关。考虑到浮游植物生活在水体中，水和二氧化碳两因子充分满足而可略去不计，则其气候生产力即相当于光温生产力。以 $f(T)$ 表示水温对光合作用的影响函数，35℃为有利浮游植物光合作用的水温上限，0 ℃为下限，函数值域在 0~1 之间，T 为某时段平均水温、M 为使 $\sum\frac{T}{35}$ 居于 0~1 值域间的控制系数，这

取用经验值 $M=10$，则有：

$$f(T)=\begin{cases}0 & (T<0℃)\\ \frac{1}{M}\sum\frac{T}{35} & (0℃<T<35℃)\\ 1 & (T>35℃)\end{cases}$$

各地浮游植物生长季逐月的月平均水温由气温 T_a 与水温 T 的线性关系式求算，即：

$$T=\left[a+b\left(N'-\alpha'\right)+cH\right]T_a+\left[d+e\left(N'-\alpha'\right)+fH\right]$$

式中，α' 为纬度参数；N' 和 H 分别为当地的纬度与海拔高度时，$a、b、c、d、e$ 与 f 为模式参数。光温生产力 $P_Y(R,T)$ 得自：

$$P_Y(R,T)=P_Y(R)\cdot f(T)$$

黄河下游断面形态与水沙输移关系模拟模型

梁志勇，曾庆华，周文浩：黄河下游断面形态与水沙输移关系及数学模拟方法 地理研究，1993，12(2)

1. 来水来沙及其搭配对断面形态的影响

(1) 河流断面形态表达式：

$$\begin{cases}B_i=f_1\left(B_{i-1},Q_{i-1},Q_i\right)\\ h_i=f_2\left(h_{i-1},Q_{i-1},Q_i\right)\end{cases}$$

式中，B_{i-1}，B_i 分别为第 i，$i-1$ 时段河流的宽度；h_i，h_{i-1} 分别为第 i，$i-1$ 时段的水深；Q_{i-1}，Q_i 分别为第 i，$i-1$ 时段的河流流量；f_1，f_2 代表函数关系。

(2) 宽深比与流量的关系式：

$$\overline{\left(\frac{B}{h}\right)}=\frac{\alpha}{Q^{0.29}}$$

式中，B 为河宽；h 为水深；Q 为流量；α 为系数。

(3) 输沙率与流量关系式：

$$Q_s=K(QJ)^m$$

式中，Q_s 为输沙率；Q 为流量；指数 m 小者为游荡行河流，大者为弯曲型河流。

2. 断面形态对输水输沙的影响

(1) 流速公式：

$$v=\frac{1}{n}R^{2/3}J^{1/2}$$

(2) 挟沙公式：

$$s=k\left(\frac{v^3}{gh\omega}\right)^m$$

(3) 热烈兹拿柯夫断面形状参数：

$$\beta_*=\frac{\int_0^\beta h^{3/2}\mathrm{d}z}{AH^{1/2}}>1$$

式中，β_* 为断面形状参数；H 为断面平均水深；A 为断面面积；z 为沿河宽方向的坐标。

(4) 断面平均含沙量计算公式：

$$\bar{s}=\eta\frac{\rho}{\rho_s-\rho}\frac{vJ}{\omega}\alpha_*$$

$$\alpha_*=\frac{\int_0^B h^2\mathrm{d}z}{\overline{H}\int_0^B h^{3/2}\mathrm{d}z}>1$$

式中，$\bar{s}$ 为断面平均含沙量；η 为水流功率用于悬浮泥沙的分数；ρ_s，ρ 分别为泥沙与水体密度；ω 为泥沙沉速；v 为流速；A 为比降；α_* 为断面形状参数。

3. 主流摆动及坍岸所造成断面变化模型

(1) 泥沙连续方程：

不考虑滩坎坍塌：

$$\frac{\partial(QS)}{\partial x}+\gamma'\frac{\partial(\Delta A)}{\partial t}+\frac{\partial(AS)}{\partial t}=0$$

式中，S 为含沙量；γ' 为泥沙干容重；ΔA 为断面冲淤面积；A 为过水断面面积。

考虑滩坎坍塌：

$$\frac{\partial(QS)}{\partial x}+\gamma'\frac{\partial(\Delta A)}{\partial t}+\frac{\partial(AS)}{\partial t}-\gamma'h'\frac{\partial B'}{\partial t}=0$$

式中，h' 为岸高；$\frac{\partial B'}{\partial t}$ 为坍岸速率。

(2) 输沙方程：

不考虑滩坎坍塌：

$$\frac{\partial(QS)}{\partial x}=-(\alpha\omega S-E)B$$

考虑滩坎坍塌：

$$\frac{\partial(QS)}{\partial x}=-(\alpha\omega S-E)B+\gamma' h'\frac{\partial B'}{\partial t}$$

4. 纵向冲淤量在横断面上分布的模拟方法

冲刷量的的横向分布公式：

$$\Delta z=\frac{h_1^{\beta}}{\sum_{i=1}^{m}h_1^{\beta}\Delta b_i}\Delta A \quad 且 \quad \Delta z\propto S_i-S_1^{*}$$

式中，ΔA 为冲刷面积；Δb_i 为第 i 条垂线单位的宽度；$\sum_{i=1}^{m}$ 为对整个断面内的根垂线单元求和；S_1^{*} 为垂线挟沙力，$S_1^{*}=k\left(\frac{u^3}{gh\omega}\right)^m$，其中 u，h 分别为垂线流速与水深，$m=185\frac{\omega_0}{v}-0.006$。

河川径流与泥沙沿程曲线模型

冯光杨：河川径流与泥沙沿程曲线．自然资源，1993，4

(1) 径流沿程曲线模型：

$$P_W=\sum_{d=1}^{n}(M_d/M_n-1)$$

(2) 输沙量沿程曲线模型：

$$P_g=\sum_{d=1}^{n}(E_d/E_n-1)$$

(3) 含沙量沿程曲线模型：

$$P_s=\sum_{d=1}^{n}(S_d/S_n-1) \quad (d=1,2,\cdots,n)$$

式中，M 为径流模数；E 为输沙模数；S 为含沙模数；d、n 分别为区间和第 n 个水文站。

流域系统的动力学机制公式

马新中，陆中臣，金德生：流域地貌系统的侵蚀演化与耗散结构．地理学报，1993，48(4)

设 $f(x)=(1-x)^{\alpha}$，$\alpha>0$，$x\in[0,1]$ 为流域相对面积之比，则流域系统的广义力为：

$$X(x)=-\mathrm{grad}\frac{1}{f(x)}=\frac{f'(x)}{f^2(x)}$$

广义流为：

$$J(x)=\lim_{\Delta x\to 0}\left[\frac{\Delta x}{\Delta f(x)}\right]^{\beta}=[f'(x)]^{-\beta}。$$

在平衡态附近，流域系统的熵产生为：

$$\delta=\frac{ds}{dt}=\int_0^1 J(x)\cdot X\mathrm{d}x=\left(\frac{E}{1-E}\right)^{\frac{2(1-E)}{1-2E}}\frac{1-E}{1+E}$$

式中，$E=1-\int_0^1 f(x)\,\mathrm{d}x=\frac{\alpha}{1+\alpha}$。

当系统远离平衡态时：

$$\delta J=J'X$$

$$\delta X=X'X$$

$$\delta_x P=\sum\delta J\cdot\delta X=\frac{-\alpha^3(\alpha^2-1)\beta}{-\alpha\beta-\beta-3}$$

土壤侵蚀的坡度界测定模型

曹文洪：土壤侵蚀的坡度界限研究．水土保持通报，1993，13(4)

(1) 单宽流量模型：

$$\frac{dp}{dx}x=\frac{1}{n}h_a^{5/3}\tan^{0.5}\alpha$$

式中，$\frac{dp}{dx}x$ 为距分水岭 x 处的单宽流量；h_a 为水层厚度；α 为坡面角。

(2) 坡面水流冲刷能力模型：

$$\tau_0=r\left(\frac{dq}{dx}nx\right)^{3/5}\frac{\sin\alpha}{\tan^{0.3}\alpha}$$

式中，τ_0 为距分水岭 x 处的坡面水流冲刷能力；r 为水的比重。

陡坡侵蚀产沙特点及含沙量过程计算模型

范荣生，王高英，李占斌：陡坡侵蚀产沙特点及含沙量过程计算模型研究．水土保持通报，1993，13(4)

1. 人工模拟降雨(定雨强)陡坡面侵蚀产沙模型

(1) 土壤重量比含水率 ξ 模型：

$$\xi=\frac{m_{s+\omega}-m_s}{m_s}$$

(2) 土壤干容重 γ_s 模型：

$$\gamma_s = \frac{m_s}{V}$$

式中，$m_{s+\omega}$ 为湿土重；m_s 为干土重；$\bar{V}$ 为样土容积。

(3) 雨滴侵蚀产沙率过程的模型：

$$s(t) = s'(t) + \mathrm{d}s(t)$$

式中，$s' = k\left(\frac{V^3}{gh\omega}\right)^m$；$V = \frac{1}{h}J^{1/2}h^{2/3}$；$\mathrm{d}s = ae^{-bt_c}$；$\omega$ 为泥沙沉速；V 为水流速度；h 为水深；g 为重力加速度；k 为系数；m 为指数；t_c 为净雨时间；a,b 为参数。

2. 黄土丘陵区天然径流场含沙量过程的模拟

(1) 散粒噪声模型：

$$Q(t) = \sum_{i=0}^{N-1} y_i e \cdot b(t - \tau_i)$$

式中，$Q(t)$ 为 t 时刻的函数值；y_i 为 τ_i 时刻的脉冲高度；b 为参数，表示衰减特性；N 为脉冲数。

(2) 变雨强时，降雨径流侵蚀产沙过程的计算模型：

$$s(t) = k_2 q^{0.6} + \sum_{i=0}^{N-1} \frac{k_1}{t^\beta} \mathrm{d}I_i^\alpha e^{-b(t-\tau_i)}$$

式中，$\mathrm{d}I$ 为相邻两个时段雨强的增量；t 为产流历时；k_1,k_2,α,β,b 均为参数。

水流垂向扩散强度公式

时伟荣：长江口浑浊带含沙量的潮流变化及其成因分析．地理学报，1993，48(5)

水流垂向扩散强度可由涡动扩散系数 K_Z 表示为局部理查德数(Richardson number)的函数：

$$K_Z = k(1 + \alpha \cdot R_i)^{\beta}$$

$$R_i = -\frac{g}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z} \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^{-2}$$

$$\rho = C + \frac{\rho_w}{\rho_s}(\rho_s - C)$$

$$\rho_w = \rho_0(1 + \gamma s)$$

$$v = (az^2 + bz + c)\ln z + d$$

式中，k=0.40 为冯-卡门常数；α 和 β 为经验系数；g 为重力加速度；v 为纵向平均流速；z 为垂直方向，向下为正；ρ 为水沙混合物比重；C 为含沙量($\mathrm{g \cdot cm^{-3}}$)；ρ_w 为咸水比重；$\rho_0 = 1$ 为净水比重；$\gamma = 7.6\times10^{-4}$ 为比例系数；s 为含盐量；$\rho_s = 2.65(\mathrm{g \cdot cm^{-3}})$ 为悬沙干比重；a,b,c,d 为本文利用近底层三层($1.0H$，$0.8H$，$0.6H$)实测流速数据拟合的流速垂向分布的拟合系数。

枯季径流预报的自回归模型

鲁小清，冯平：用自回归模型预报枯季径流初探．水土保持通报，1993，13(6)

(1) AR(2)(枯季径流预报)模型：

$$X_t = u + \varphi_1(X_{t-1} - u) + \varphi_2(X_{t-2} - u) + \varepsilon_t$$

$$u = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_t$$

式中，ε_t 与 X_t 无关，是独立随机变量；φ_1,φ_2 为自回归权重系数。

(2) AR(2)模型的方差谱密度 $S(f)$ 模型：

$$S(f) = \frac{(1-\varphi_2)(1-\varphi_1^2+\varphi_2^2-2\varphi_2)}{(1-\varphi_2)(1+\varphi_1^2+\varphi_2^2-2A-2B)}$$

其中，$A = \varphi_2(1-\varphi_2)\cos 2\pi f$；$B = \varphi_2 \cos 4\pi f$

减水减沙量模型

柳荣光：渭河流域减水减沙效益分析与流域水沙变化趋势预测．水土保持通报，1993，13(6)

$$\Delta W = \sum_{i=1}^{n} M \cdot f_i \cdot \eta_i$$

$$\Delta W_s = \sum_{i=1}^{n} M_s \cdot f_i \cdot \eta_{si}$$

式中，ΔW 为坡面措施减水量；ΔW_s 为坡面措施减沙量；f_i 为某种坡面措施；η_i,η_{si} 为某种坡面措施减水减沙指标；M 为计算时段内流域非治理状态下年产流模数；M_S 为计算时段内流域非治理状态下年产沙模数。

水文平衡方程

Farrar T J, Nicholson S E, Lare A R：土壤类型对半干旱 Botswana 的 NDVI、降雨和土壤水分关系的影响——Ⅱ NDVI 对土壤水分的反应．Remote Sensing of Environment, 1994, 50

$$P = E + N - \frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t}$$

式中，P 是降水，E 是蒸散量，N 是径流，$\mathrm{d}m/\mathrm{d}t$ 是土壤水分储量的变化。

将各种假设与参数代入上式可得到一个常微分方

程：

$$m-\overline{m}=e^{-t/t^*}\left(c_{\text{const}}+\int_{e^{t/t^*}}P'\mathrm{d}t\right)$$

式中，P' 表示减少的降水，$\overline{m}$ 是土壤水分的初始值。

蒸发计算方法

陈发祖、孙晓敏、汪西林等：高地下水埋深条件下的农田水热平衡试验研究．地理研究，1994，14(1)

(1) 包文比能量平衡法：

$$\lambda E=\frac{R_n-G}{1-\beta}=\frac{R_n-G}{1+\frac{C_P}{\lambda}\frac{\Delta T}{\Delta q}}$$

式中，λ 为水的蒸发潜热；E 为蒸发量；R_n 为净辐射能；G 为土壤热通量；β 为包文比；C_P 为空气定压比热；ΔT 为两高度的温度差；Δq 为相应的比湿梯度。

(2) 综合空气动力学方法：

$$H_{dy}=-\rho C_P K^2(z-d)^2\frac{\Delta u}{\Delta z}\frac{\Delta\theta}{\Delta z}/\Phi_M\Phi_H$$

$$\lambda E_{dy}=-\lambda\rho K^2(z-d)^2\frac{\Delta u}{\Delta z}\frac{\Delta q}{\Delta z}/\Phi_M\Phi_W=R_n-G-H_{dy}$$

式中，ρ 为空气密度；K 为 Von Karmam 常数；z 为高度；d 为零面位移；$\frac{\Delta u}{\Delta z}$ 为风速梯度；$\frac{\Delta\theta}{\Delta z}$ 为温度梯度；$\frac{\Delta q}{\Delta z}$ 为比湿梯度；Φ_M，Φ_H，Φ_W 为动量、热量和水汽的无因次稳定度通用函数。

Businger-Dyer 公式：

$$\Phi_M=\Phi_H=\Phi_W=1\qquad(\zeta=0)$$

$$\Phi_M=\Phi_H=\Phi_W=(1-16\zeta)^{0.5}\qquad(\zeta<0)$$

$$\Phi_M=\Phi_H=\Phi_W=1+5.2\zeta\qquad(\zeta>0)$$

(3) 综合热量平衡——涡旋相关法：

$$H_{ed}=\rho C_P\overline{w'\theta'}$$

$$\lambda E_{ed}=\rho\lambda\overline{w'q'}=R_n-G-H_{ed}$$

(4) 水量平衡法：

$$P-I_r+I_g=E+R_{off}+I_f+\Delta W$$

$$I_g=E_0\left(1-\frac{\Delta h}{\Delta h_0}\right)^n$$

式中，P 为降水；I_r 和 I_g 分别为灌溉和地下水对土壤水和蒸发的补给量；E 为蒸发；I_f 为下渗；R_{off} 为地表径流；ΔW 为土壤平衡储水量变化；E_0 为水面蒸发力；Δh 为地下水埋深；Δh_0 为地下水补给量为零时的极限埋深；n 为系数。

黄河下游河流纵剖面平行抬升的统计检验模型

贾绍凤：黄河下游河流纵剖面平行抬升的统计检验．地理研究，1994，13(2)

(1) 河流剖面变化模型：

$$Z(x,T)=D(x,T)+W(x,T)+\varepsilon(x,T)+T(x,0)$$

式中，x,T 分别为距离和时间；Z 为纵剖面高程；D,W,ε 分别为纵剖面高程的趋势变化部分、周期变化部分和随机变化部分。

(2) 滑动平均分式：

$$\overline{Z}_i=\sum_{j=i-k}^{i+k}\alpha_j Z_j$$

式中，$\overline{Z}_i$ 为对应 T_i 时的滑动平均值；α_j 为权重系数，$\alpha_j=\frac{1}{2k+1}$，$(2k+1)$ 为滑动平均时间长度。

(3) 不同站间同流量水位差的常数检验：

设纵剖面上任两站之间的同流量水位差服从均值为 μ 的正态分布当显著水平为 α 时，如果满足 $|t|=\frac{\left|\left(\overline{\Delta Z}-\mu\right)\right|\sqrt{N}}{S_{\Delta Z}}>t_{1-\frac{1}{2}\alpha}$，则上述假设不成立。式中，$N$ 为样本容量；ΔZ 为某两站间的落差；$\overline{\Delta Z}$ 为样本均值；$S_{\Delta Z}$ 为经验方差；μ 为参数。

(4) 两站间逐年水位升降值的等均值检验：

$\Delta Z_1,\Delta Z_2$ 分别为纵剖面上两个站点的同流量水位年度变化值。假设河流纵剖面是平行抬升的，即：$\overline{\Delta Z_1}=\overline{\Delta Z_2}$。

如果 $|t|=\frac{\left|\left(\bar{x}-\bar{y}\right)\right|\sqrt{N}}{S_\Delta}>t_{1-\frac{1}{2}\alpha}$，则等均值的假设不成立。式中，$x,y$ 分别为两个总体；Δ 为两个样本之差；S_Δ 为经验方差。

地下水位系统模拟预测模型

侯彦林，石元春："引黄入淀"工程对区域水土资源影响预测——献县至白洋淀区段．自然资源学报，1994，9(2)

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(KM\frac{\partial H}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(KM\frac{\partial H}{\partial y}\right)+W(x,y,t)=\mu\frac{\partial H}{\partial t}$$

$$((x,y)\in D;\quad t>0)$$

式中，H 为地下水水位(L)；x、y 为笛卡儿坐标；M 为第一稳定水底板以上沙层总厚度(L)；K 为渗透系数(LT^{-1})；μ 为给水度；t 为时段(T)；W 为源汇项(包括降水、蒸发、灌溉和机井等子项)；D 为研究区域。

波浪冲蚀作用下淤泥质海岸剖面侵蚀演变模式

虞志英，张勇，金镠：江苏北部开敞淤泥海岸的侵蚀过程及保护．地理学报,1994，49(2)

半潮周期内破波对滩面淤泥的冲蚀率可以表示为：

$$E=\int_{\alpha}^{\beta}M\left[\left(\frac{U_{*0}}{U_{*c}}\right)^{2}-1\right]\left(1-\frac{U_{*c}}{U_{*0}}\right)\mathrm{d}t$$

式中，α 和 β 分别代表半潮周期内冲蚀历时的初时时刻与终止时刻；M 为淤泥冲刷系数；U_{*c} 为泥沙临界起动切速；U_{*0} 为底切速。

若以全潮历时为时间单元，破波对滩面淤泥的冲蚀率可以表示为：

$$E=M\int_{f(t)}^{H_{\max}}\int_{\alpha}^{\beta}\left[\left(\frac{U_{*0}}{U_{*c}}\right)^{2}-1\right]\left(1-\frac{U_{*c}}{U_{*0}}\right)p_t(H_e)\mathrm{d}t\mathrm{d}H_e$$

式中，$p_t(H_e)$ 为能造成海滩冲蚀波浪的波高 H_e 的概率密度函数；$H_{\max}$ 为最大波高值；$f(t)$ 为 H_e 的下限函数

泥石流沟谷演化的不等时距灰色预测模型

蒋忠信：泥石流沟谷演化的不等时距灰色预测．地理研究，1994，13(3)

(1) 泥石流沟谷纵剖面形态：

在条件均一、构造典型下的河谷纵剖面方程：

$$h/h_0=(l/L)^N$$

式中，h，l 分别为河谷中某点距河口的高差、河长；h_0，L 分别为流域高差和河流全长；N 为纵剖面形态指数。

(2) N 值的不等时距灰色预测方法：

设原始数列为：$x^{(0)}(k),k=1,2,\cdots,n$，且 $x^{(0)}(k)$ 与 $x^{(0)}(k-1)$ 之间的时距为 $T(k)-T(k-1)$.

原始数据的一次累加式：

$k=1$ 时：

$$x^{(1)}(k)=x^{(0)}(k)$$

$k\geq 2$ 时：

$$x^{(1)}(k)=x^{(1)}(k-1)+\frac{1}{4}[T(k)-T(k-1)]\cdot x^{(0)}(k-1)+\frac{3}{4}[T(k)-T(k-1)]\cdot x^{(0)}(k)$$

据此做 GM(1,1)预测，得预测得累加量 $\hat{x}^{(1)}(k)$，再按 $\hat{x}^{(0)}(k)=\hat{x}^{(1)}(k)-\hat{x}^{(0)}(k-1)$式计算预测值。

修正后的预测式：

$$\hat{x}^{(0)}=\left[\hat{x}^{(1)}(k)-\hat{x}^{(1)}(k-1)\right]/(1-\bar{\Delta})$$

式中，$\bar{\Delta}=\sum_{i=1}^{n}\left[\left(x^{(0)}(i)-\hat{x}^{(0)}(i)\right)/x^{(0)}(i)\right]/n$。

溶蚀量的估算模型

李钜章，林钧枢，房金福：喀斯特溶蚀强度分析与估算．地理研究，1994，13(3)

$$\ln x=\alpha_p\ln p+\alpha_{lf}\ln lf+\alpha_G\ln G=(a+b+c)\Big/\left(\frac{a}{\ln p}+\frac{b}{\ln lf}+\frac{c}{\ln G}\right)$$

式中，x 为溶蚀量；lf 为岩石可溶性分值；p 为年降水量；G 为地貌分值；a、b、c 为待定系数。

山东临淄地区喀斯特-裂隙水资源的管理模型

朱学愚，朱国荣，吴春寅等：山东临淄地区喀斯特-裂隙水资源的管理模型．地理学报，1994，49(3)

山东临淄地区的地下水运动，没有发现地下暗河和管道流，因此，可近似地把本区的地下水流概化为非均质各向异性介质中的二维达西流：

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(T_{xx}\frac{\partial H}{\partial x}+T_{xy}\frac{\partial H}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(T_{yx}\frac{\partial H}{\partial x}+T_{yy}\frac{\partial H}{\partial y}\right)+W=S_T\frac{\partial H}{\partial t}+\sum_{j=1}^{m}Q_{ij}(x_j,y_j,t_i)\,\delta(x-x_j,y-y_j)$$

式中，T 为导水系数张量，四个分量为 T_{xx}，T_{xy}，T_{yx} 和 T_{yy}；H 为水头；$S_T=\begin{cases}S & (在承压水区)\\ \mu & (在潜水区)\end{cases}$，$S$ 为储水系数(弹性释水系数)；μ 为给水度；

$W = W_P + W_R + W_I + W_G + W_W$ 为垂直方向上的补给(或排泄)强度；W_P 为降水入渗补给量；W_R 为第四系含水层对灰岩含水层的越流补给量；W_I 为灌溉渗漏和田间灌溉水对地下水的补给量；W_G 为淄河渗流通过河床砾石层对喀斯特-裂隙水的补给量；W_W 为第四系水通过"天窗"对灰岩水的补给量；m 为开采井的总数；x_j, y_j 为 j 号开采井的 x，y 坐标；Q_{ij} 为 j 号开采井在 t_i 时刻的开采量；$\delta(x - x_j, y - y_j)$ 为二维狄拉克(Delta)函数。

流域拓扑预测及坡面减沙效益评判模型

苏光全、千枝茂：流域减沙效益拓扑分析——以延河流域为例。水土保持通报，1994，14(3)

(1) 预测波型 $\hat{X}^{(0)}$ 模型：

$$\hat{X}^{(0)} = \varepsilon_{\hat{q}(k)} + \frac{[t - \hat{q}_{(k)}][\varepsilon_{\hat{q}(k+1)} - \varepsilon_{\hat{q}(k)}]}{\hat{q}_{(k+1)} - \hat{q}_{(k)}}$$

$$(k = 1, 2, \cdots, n)$$

(2) 流域治理后所在年份理论输沙量 W_{sc} 模型：

$$W_{sc} = \varepsilon_{\hat{q}(f)} + \frac{[t - \hat{q}_{(f)}][\varepsilon_{\hat{q}(f+1)} - \varepsilon_{\hat{q}(f)}]}{\hat{q}_{(f+1)} - \hat{q}_{(f)}}$$

$$(f \in [1, 2, \cdots, n])$$

(3) 流域治理后年均减沙量 C 模型：

$$C = \Delta W_s - \Delta W_{kb} - \Delta W_{hg} - \Delta W_j + \Delta W_r$$

式中，ΔW_s, ΔW_{kb} 和 ΔW_{hg} 分别为治理后相对治理前整个流域减沙、库坝增沙、河道灌溉淤积年均值；ΔW_j 为因降水因素所减少的泥沙；ΔW_r 为治理后相对治理前人为增沙量。

月径流和月输沙集中特性模型

姜永清、王万中、胡光荣：陕北河流月径流和月输沙集中特性初步研究。水土保持通报，1994，14(4)

1. 月径流和月输沙量集中程度的表达方式

(1) 集中指数 A_g 模型：

$$A_g = \frac{A - R}{M - R}$$

式中，A 为按降序排列的分量百分数累积量；R 为均匀分配时分量百分数累积量；M 为最集中分配时分量百分数累积量。

(2) 吉布斯-马丁分散指数 $G.M$ 模型：

$$G.M = 1 - \frac{\sum x^2}{\left(\sum x\right)^2}$$

(3) 不均匀系数 Cl 模型：

$$Cl = \frac{\sum x_i - k\bar{x}}{12\bar{x}}$$

式中，x_i 为大于月均值的月分量；$\bar{x}$ 为年均值；k 为月均值超过年均值的月数。

(4) 集中度 C_n 模型：

$$C_n = \frac{\sqrt{R_x^2 + R_y^2}}{\sum x_i}$$

$$R_x = \sum x_i \sin\theta_i$$

$$R_y = \sum x_i \cos\theta_i$$

式中，$i = 1, 2, \cdots, 12$，为月份；θ_i 为各月所占的角度，总计 $360°$。

(5) 集中期 D 模型：

$$D = \arctan\frac{R_x}{R_y}$$

(6) 变异系数 C_v 模型：

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})}{N}}}{\bar{x}}$$

2. 河流月径流和月输沙集中特性与输沙径流年总量相关分析

(1) 关联系数 $\varepsilon_{oi}(k)$ 模型：

$$\varepsilon_{oi}(k) = \frac{\Delta\min + \rho\Delta\max}{\Delta oi(k) + \rho\Delta\max}$$

$$\Delta oi(k) = |x_0(k) - x_i(k)|$$

$$\Delta\max = \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|$$

$$\Delta\min = \min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|$$

(2) 关联度 r_{oi} 模型：

$$r_{oi} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\varepsilon_{oi}(k)$$

式中，$i = 1, 2, \cdots$ 为比较序列因子数；$k = 1, 2, \cdots, N$ 为样本数；ρ 取值 0.5；x_0 为参比因子值。

融冻泥流舌表面与前缘运动量公式

刘耕年，熊黑钢：天山高山冰缘环境的融冻泥流作用。地理学报，1994，49(4)

在泥流舌表面垂直地插入地下一定长度 L 的桩，由于活动层向坡下运动的速度剖面由地表向下变小，泥流运动时会带动插入的桩一起位移，使桩向下游倾伏（近似地认为桩的下部不动，只是上部向下倾斜），则：

$$S = L\frac{\sin\alpha}{\sin\left(180^\circ - \beta - \alpha\right)}$$

式中，S 为运动量；L 为桩的埋深；α 为桩的倾角变化；β 为地面坡度。

消融冰川表面能量平衡方程

康尔泗，Atsumu Ohmura：天山冰川消融参数化能量平衡模型。地理学报，1994，49(5)

$$H_M = H_{NR} + H_S + H_L$$

$$H_{NR} = R_G(1-\alpha) + \varepsilon_e\varepsilon_a\sigma T_a^4 - \varepsilon_e\sigma T_e^4$$

式中，H_M 为冰雪融化热；H_{NR} 为净辐射；H_S 为感热通量；H_L 为潜热通量；R_G 为总辐射；α为反射率；ε_e 为表面长波吸收或放射系数；ε_a 为大气放射系数；σ为斯蒂芬-玻尔兹曼常数；T_a 为气温(K)；T_e 为表面温度(K)。

Darcy-Weisbach 公式

高进：冲积河流的汇合与分流。地理学报，1994，49(5)

$$h_f = \lambda\frac{L}{4R}\frac{v^2}{2g}$$

式中，λ 为沿程水头损失系数；R 为水力半径；v 为平均流速；g 为重力加速度；L 为河道长度。

最大负游程长概率分布函数

冯国章：极限水文干旱历时概率分布的解析与模拟研究。地理学报，1994，49(5)

$$F_N(L) = p_N(t \le L) = \sum_{t=0}^{L} p_N(L=t) = \sum_{t=0}^{L-1} p_{N-1}(L=t)p + \sum_{t=1}^{L-1}\left\{\left[p_{N-1}(L=t-1) - \sum_{j=1}^{k_1} p_{N-j-1}(L=t-1)pq^{j-1}\right]q + \sum p_{N-j-1}(L=t)pq^j\right\} + \Phi(N-1)$$

式中，X_t $(t=1,2,\cdots,N)$为一个具有 N 个独立同分布的随机变量序列；这一序列被给定截取水平 X_0 截取后，产生两个截然不同的独立事件，既亏缺量($X_t < X_0$)和盈余量($X_t > X_0$)，其概率分别为 $q = P(X_t < X_0)$ 和 $p = 1-q = P(X_t > X_0)$；L 为极限干旱历时的长度,以年为单位；$\Phi(N-1) = \begin{cases} 0 & (L<N) \\ p_{N-1}(L=N-1)q & (L=N) \end{cases}$；$k_1 = \min\{N-t, t-1\}$；$k_2 = \min\{N-t-1, t\}$。

回归统计量 F 模型

杨开宝，郭培才：陕北丘陵沟壑区降雨侵蚀力指标研究。水土保持通报，1994，14(5)

$$F = \frac{r^2/p}{\left(1-r^2\right)/\left(n-p-1\right)}$$

式中，r 为相关系数；p 为自变量个数；n 为样本数。

玉米最大产量估算模型

吴战平：大娄山南坡玉米产量估算与增产对策研究。自然资源，1994，5

作物最大产量估算 Y_{me} 模型：

$$Y_{me} = KC_HC_TGY_0\frac{E_{Tm}}{e_a - e_d}$$

式中，K 为作物种类校正系数；C_H 为收获指数；C_T 为温度校正系数；G 为全生育期天数；$e_a - e_d$ 为饱和差；Y_0 为标准杆物质产量；E_{Tm} 为平均日最大蒸散量。

年内不均匀系数模型

冯光扬：年内不均匀系数探讨。自然资源，1994，5

(1) 年内分配不均匀变差系数 C_a 模型：

$$C_a = \frac{\delta}{V_c} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{V_j}{V_c} - 1\right)^2}$$

$$V_c = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} V_j$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left(V_j - V_c\right)^2}$$

式中，V_j 为各时段径流量，$j=1,2,\cdots,n$；δ 为均方差；V_c 为时段平均径流量。

(2) 完全年调节系数 C_L 模型：

$$C_L = \frac{W}{V}$$

$$V = \sum_{j=a}^{b} V_j$$

$$V_c = \frac{1}{n} V$$

$$W = \sum_{j=a}^{b} (V_j - V_c)$$

式中，a 为余水期的起点；b 为供水期末的次年。

(3) 年内分配不均匀系数 C_1 模型：

$$C_1 = \left(\sum_{i=1}^{n} Q_i - nQ_0 \right) \Big/ 12Q_0$$

或

$$C_1 = \left[\sum_{i=1}^{n} Q_i - nQ_0 - \left(mQ_0 - \sum_{i=1}^{m} Q_i \right) \right] \Big/ 12Q_0$$

或

$$C_1 = \sum_{1}^{t'} Q_i' \Big/ \sum_{1}^{12} Q_i - \frac{t'}{12}$$

或

$$C_1 = \frac{P_k - P_1}{n\bar{x}}$$

式中，n 与 $\sum_{i=1}^{n} Q_i$ 分别为月平均流量 Q_i 大于年平均流量 Q_0 的月数与该 Q_i 的流量和；m 与 $\sum_{i=1}^{m} Q_i$ 分别为月平均流量 Q_i 小于年平均流量 Q_0 的月数与该 Q_i 的流量和；t' 与 $\sum_{i=1}^{t'} Q_i'$ 分别为月平均流量 Q_i' 大于年平均流量 Q_0 的月数与该 Q_i' 的流量和；$\sum_{i=1}^{12} Q_i$ 为 1~12 月月平均流量 Q_i 之和；$P_j = \sum_{i=1}^{j} (P_i - \bar{x}), (j = 1,2,\cdots,n)$；

$$P_k = \max\{P_j, j = 1,2,\cdots,n\},$$

$$P_1 = \begin{cases} \min\{P_j, j = 1,2,\cdots,n\} & (\min(P_j) < 0) \\ 0 & (\min(P_j) \geq 0) \end{cases}$$

降雨径流因素及地面坡度对片蚀的影响模型

刘志，江忠善：降雨因素和坡度对片蚀影响的研究．水土保持通报，1994，14(6)

(1) 坡面径流总势能 E_p 模型：

$$E_p = \frac{1}{2} \rho g B h H^2 \cot\theta$$

式中，ρ 为水的密度；g 为重力加速度；B 为坡面宽度；h 为水平面上径流深；H 为坡面高度；θ 为地表坡度。

(2) 单次降雨片蚀量 A 模型：

$$A = ak(E)^m (E_{pu})^n$$

式中，k 为反映土壤易蚀性效应因子；E 为降雨动能；E_{pu} 为单位面积径流势能；a、m 和 n 为待定系数。

(3) 年均片蚀量 G_0 模型：

$$G_0 = K_1\theta^2 + K_2\theta + K_0$$

式中，K_0、K_1 和 K_2 为方程系数；θ 为地表坡度

湿润半湿润地区水资源评估的水文模拟

夏岑岭，赵人俊，于传恂等：湿润半湿润地区水资源评估水文模拟方法．自然资源，1994，6

(1) 蒸发能力模拟——蒸发能力 EP 模型：

$$EP = \alpha\beta P^r R_a$$

式中，R_a 为以等效蒸发量表示的大气顶层辐射量；P 为降水量；α 为与高程、风速等有关的修正系数；β 为地温延滞改正系数；r 为以降水量反应云量的指数。

(2) 陆面蒸散发评估——陆面蒸散发量 E 模型：

$$E = P - R - \Delta W$$

式中，P 为降水量；R 为径流量；ΔW 为流域蓄水变化量。

(3) 缺乏水文资料地区水资源评估——流域平均蓄水容量 SM 模型：

$$SM = \sum_{i=1}^{n} P_i Sm_i$$

式中，n 为分区数量；P_i 为各区面积与流域面积比值；Sm_i 为蓄水容量。

地下水资源调节计算模型

李庆湘，叶水庭，杨宇军：黄泛平原区地下水资源调节——以裕民区调蓄灌区为例．自然资源，1995，1

(1) 地下水开采量模型：

$$H_g = (H_1 - \alpha P - \beta H_{S_1}) / \gamma$$

式中，H_g 为需要开采的地下水量；H_i 为作物需水量；P 为降水量；α 为降水有效利用系数；β 为地表水的有效利用系数；H_{S_i} 为需要引用的地表水量；γ 为地下水的有效利用系数

(2) 地下水位模型：

$$\Delta = \Delta B + \Delta H_e + \Delta H_g + \Delta H_p - \Delta H_s$$

式中，Δ 为时段末的地下水埋深；ΔB 为时段初的地下水埋深；ΔH_e 为潜水蒸发在计算时段内引起的地下水位下降值；ΔH_g 为计算时段内由于开采引起的地下水位下降值；ΔH_p 为计算时段内由于降水引起的地下水位升幅；ΔH_s 为计算时段内由于引用地表水灌溉引起的地下水位升幅。

沟道防护体系建设拦蓄效益模型

胡高纯，张丙申，杨文胜：基岩山地小流域治理开发途径探讨——以暴雨中心区费山县清水河试点流域为例，水土保持通报，1995，15(1)

1. 沟道防护体系建设

(1) 洪峰流量 Q_p 模型：

$$Q_p = 0.278 C L_p F$$

$$L_p = \frac{S_p}{Tn}$$

式中，C 为径流系数；F 为集水面积；L_p 为频率为 P 的暴雨强度；S_p 为设计一小时暴雨量；T 为集流时间；n 为暴雨递减指数。

(2) 溢流水深 H_0 模型：

$$H_0 = 0.763\left(\frac{Q_p}{B}\right)^{2/3}$$

式中，H_0 为矩形断面溢流深；B 为溢流宽度。

(3) 坝顶宽 B 模型：

$$B = \frac{1.81P_{平} - 0.4H^2}{2H}$$

$$P_{平} = P_{水} + P_{沙}$$

$$P_{水} = \frac{r_0}{2}\left(H_1^2 - H_0^2\right)$$

$$P_{沙} = 0.1839H^2$$

式中，$P_{平}$ 为水和游沙对滑动体的水平压力；$P_{水}$ 为水对滑动体的水平压力；$P_{沙}$ 为游沙压力；r_0 为水流重率；H_1 为滑动体高度与溢流水深之和；H 为谷坊高度

(4) 坝顶砌石大小模型：

$$D = \frac{r_0 V_{kp}^2}{A^2 2g(r_1 - r_0)}$$

$$V_{kp} = \frac{Q_p}{h_{kp} BL}$$

$$W = \frac{1}{6}\pi D^3 r_1 k$$

式中，D 为砌石转换成圆形石的直径；r_0 为浑水容重；V_{kp} 为推移石块的临界流速；h_{kp} 为临界水深；A 为系数；r_1 为砌石比重；W 为砌石重量；k 为安全系数。

2. 拦蓄效益

削减洪峰流量效益 η_3 模型：

$$\eta_3 = \frac{Q_m - Q}{Q_m} \times 100\%$$

式中，Q_m 为治理前洪峰流量；Q 为治理后洪峰流量。

考虑随机输入信息的浅层地下水系统模型

石玉波，周之豪：考虑随机输入信息的浅层地下水系统模型，自然资源学报，1995，10(1)

1. 水量转换模型

(1) 降水入渗补给机制及计算模型：

降水入渗补给量的计算公式为：

$$W_p(H) = a(H_{wp} - H)^b \exp[-c(H_{wp} - H)]$$

式中，H_{wp} 为节点地面高程；a、b 和 c 分别为待定参数。

(2) 河道渗漏补给模型及水位-流量转换关系：

任一段的河道渗漏补给量为：

$$W_p(H) = C(H)(Q_{out,t} - Q_{in,t})$$

河道水位 h_r 由流量和曼宁公式决定：

$$Q_{out} = \frac{\eta}{n} A R^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}}$$

式中，η 为单位换算系数；A 为河道横断面面积；R 为水力半径；n 为河床摩阻系数；S_f 为河道比降。

置换曼宁公式中的河道形状及水力半径，河道水位可表示为：

$$h_r = \left[\frac{n}{\eta}\frac{Q_{out}}{S_f^{\frac{1}{2}}}\frac{(\theta+1)^{\frac{5}{3}}}{\gamma}\right]^{\frac{1}{\theta}+\frac{5}{3}}$$

式中，γ 和 θ 均为河道几何形状参数

2. 时间降水量系列随机生成方法

(1) 矩法计算样本参数：

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

$$C_v = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(k_i - 1)^2}$$

$$C_s = \frac{\frac{1}{n-3}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^3}{\left[\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2\right]^{\frac{3}{2}}}$$

(2) 采用乘同余法生成 0~1 区间随机数：

$$X_{n+1} = \lambda X(\mathrm{mod}M) \quad (n = 0,1,2,\cdots)$$

式中，取 $u_{n+1} = \frac{X_{n+1}}{M}$ 作为生成的随机数。X_0、λ 和 M 为与计算机型号选用的参数。

(3) 用 Box-Mulle 法将均匀分布随机数列转换成正态分布的随机数列：

$$\xi = \sqrt{-2\ln u_1}\sin 2\pi u_2$$

(4) 由正态分布随机数列转换成 P-III 型分布的随机数：

$$\Phi_1 = \frac{2}{C_s}\left(1 + \frac{C_s\xi_1}{6} - \frac{{C_s}^2}{36}\right)^3 - \frac{2}{C_s}$$

(5) 生成年降水量系列：

$$x_1 = \bar{x} + \sigma P_i$$

可采用典型分解方法生成年内所需时段的降水量。

江苏新沂市地下水开采的数学模型

宋学愚等：江苏新沂市越流含水层的地下水资源评价。自然资源学报，1995，10(2)

开采层水头 H 的数学模型：

微分方程：

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(T\frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(T\frac{\partial H}{\partial y}\right) + \sigma(H' - H) =$$

$$S\frac{\partial H}{\partial t} + Q_j\delta(x - x_j, y - y_j)$$

初始条件：

$$H(x,y,0) = H_0(x,y) \qquad (x,y) \in D$$

边界条件：

$$H(x,y,t) = H_1(x,y,t) \qquad (x,y) \in \Gamma_1$$

$$T\frac{\partial H}{\partial n} = q(x,y,t) \qquad (x,y) \in \Gamma_{21}$$

$$T\frac{\partial H}{\partial n} = 0 \qquad (x,y) \in \Gamma_{22}$$

式中，T 为开采层的导水系统；H' 为上覆补给层(即潜水)的水头；Q_j 为 j 号水井的开采量；x_j，y_j 为 j 号水井的坐标；$\delta(x - x_j, y - y_j)$ 为 Dirac delta 函数；$\sigma = \frac{K'}{M'}$ 为越流系数，k' 为上覆弱透水层的渗透系数；M' 为上覆弱透水层的厚度；S 为开采层的储水系数；H_0 为初始水头；D 为计算区域；H_1 为第一类边界上的已知水头；q 为第二类边界上的单位法向流量；n 为边界的外法线方向；Γ_1 为第一类边界上，即已知水头边界；Γ_{21} 为已知流量边界；Γ_{22} 为隔水边界。

枯水流量概率分布的数学模型

冯国章，王双银：河流枯水流量特征研究。自然资源学报，1995，10(2)

(1) 概率点距相关系数检验法，简称 PPCC(probability plot correlation coefficient)法：

设一个待检样本 $x_i(i = 1,2,\cdots,n)$，则概率点据是指 x_i 排序(从大到小或从小到大)用第 i 项样本值 $x_{(i)}$ 的图形表示。大量研究表明，概率点据位置应用无偏点据位置，它再现了假设分布的第 i 项观测值的期望值 $E[x_{(i)}]$。基于这一基本观点，若一待检样本的实际分布服从假设分布，则排序后的观测值 $x_{(i)}$ 与假设分布的理论值，即 $x_{(i)}$ 的统计均值 $y_{(i)}$ 的概率点据存在近似线性关系。因此，可将 PPCC 检验统计量定义为排序后的观测值 $x_{(i)}$ 与假设分布的理论值 $y_{(i)}$ 之间的相关系数，即：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}[x_{(i)} - x_m][y_{(i)} - y_m]}{\left[\sum_{i=1}^{n}(x_{(i)} - x_m)^2\sum_{i=1}^{n}(y_{(i)} - y_m)^2\right]^{\frac{1}{2}}}$$

式中，$x_{(i)}$ 和 x_m 分别表示排序后的实测值和实测样本的均值；$y_{(i)}$ 和 y_m 分别是假设分布相应于 $x_{(i)}$ 的理论值和均值，理论上，$y_{(i)} = E[x_{(i)}]$，$y_m = x_m$。

实际上，PPCC 检验法就是根据实测样本序列排序后各观测值 $x_{(i)}$ 和经验频率 P_i 推求出假设分布上 P_i 对应的期望值 $y_{(i)} = E[x(i)] = F^{-1}(P_i)$，然后求两序列 $x_{(i)}$、$y_{(i)}$ $(i=1,2,\cdots,n)$ 的相关系数 r，并按一定的检验准则判断是否拒绝假设分布。

(2) 枯水径流的概率分布可选择的理论分布：

从实用性考虑，各种假设分布的概率点据的计算方法如下：

1) 皮尔逊 III 型(P-III)分布：

采用 Wilson-Hilfenty 变换法计算 $y_{(i)}$，即：

$$y_{(i)} = x_m + \sigma\left[\frac{2}{C_s}\left(1+\frac{C_s F^{-1}(P_i)}{6}-\frac{C_s^2}{36}\right)^3-\frac{2}{C_s}\right]$$

式中，x_m，σ 和 C_s 分别为实测枯水序列的均值、均方差和偏态系数；$F^{-1}(P_i)$ 是标准正态分布的逆变换。式中，$F^{-1}(P_i)$ 用 Joiner-Rosenblatt 公式计算，并按我国习惯将其转换为适合于从大到小排序的序列的标准正态分布变量 (η_i) 计算的形式，即：

$$\eta_i = F^{-1}(P_i) = 4.91[(1-P_i)^{0.14} - P_i^{0.14}]$$

式中，P_i 为排序后实测序列中 $x_{(i)}$ 对应的经验频率，这里采用 Blom 无偏估值公式：

$$P_i = \frac{i-0.375}{n+0.25}$$

式中，i 为实测序列排序后的序号；n 为序列长。

2) 对数皮尔逊 III 型(P-III)分布：

仍采用 Wilson-Hilfenty 变换法，即：

$$y_{(i)} = \exp\left\{x'_m + \sigma'\left[\frac{2}{C'_s}\left(1+\frac{C'_s F^{-1}(P_i)}{6}-\frac{C_s'^2}{36}\right)^3-\frac{2}{C'_s}\right]\right\}$$

式中，x'_m，σ' 和 C'_s 分别为 $\ln[x_{(i)}]$ 的均值、均方差和偏态系数；$F^{-1}(P_i)$ 的计算同 P-III 分布。

3) 截尾正态(TN)分布：

所谓截尾正态分布是指当正态分布计算值为负时令其为零，即：

$$y_{(i)} = x_m + \sigma\eta_i \qquad (y_{(i)}) \geq 0$$

4) 二参数对数正态(LN-2)分布：

$$y_{(i)} = \exp(x'_m + \sigma'\eta_i)$$

式中，x'_m 和 σ' 同 LP-III 分布；η_i 同前。

5) 三参数对数正态(LN-3)分布：

$$y_{(i)} = \exp(x''_m + \sigma''\eta_i)$$

式中，x''_m 和 σ'' 分别表示 $\ln[x_{(i)}-a]$ 的均值和均方差；η_i 同前。

6) 耿贝尔(E-1)分布

耿贝尔分布即极值 I 型分布，将其转换为从大到小排序的逆变换公式，其形式如下：

$$y_{(i)} = \frac{-\alpha - \ln(1-P_i)}{\beta}$$

式中，α 和 β 为耿贝尔分布参数；P_i 用耿贝尔分布的 Gringorten 公式计算，即：

$$P_i = \frac{i-0.44}{n+0.12}$$

水沙耦合模拟模型

包为民：小流域水沙耦合模拟概念模型：地理研究，1995，14(2)

(1) 流域产汇流：

坡面汇流演算式：

$$I_t = CS \cdot I_{t-1} + (1-CS)\ (R_t + R_{t-1})/2TR$$

$$CS = (2K - \Delta t)/(2K + \Delta t)$$

沟道汇流演算式：

$$Q_t = C_0 I_t + C_1 I_{t-1} + C_2 Q_{t-1}$$

式中，I 为河网入流；R 为产流；TR 为单位转换系数；K 为坡面水流平均汇集时间；Δt 为时段长；Q 为河流出流；C_0, C_1 和 C_2 为汇流系数。

(2) 流域产沙：

坡面产沙计算公式：

$$SS = \begin{cases} SC - REM[1-(1-SC/REMM)^{BS+1}] & (SC < REMM) \\ SC - REM & (SC > REMM) \end{cases}$$

$$SC = CM \cdot R \cdot A$$

式中，SS 为坡面产沙量；SC 为坡面水流挟沙能力；REM 和 $REMM$ 分别为流域平均和最大土壤抗侵蚀能力；BS 为抗侵蚀能力分布曲线指数；A 为流域面积；CM 为流域平均坡面水流最大可能含沙量。

沟蚀产沙计算公式：

$$SG = CGM \cdot \frac{U}{UM} \cdot Q$$

式中，SG 为沟蚀产沙速率；U 为断面平均流速；UM 为断面时空平均流速；CGM 为平均沟蚀产沙浓度；Q 为流量。

(3) 流域汇沙：

坡面泥沙演算式：

$$Q_t = CSS \cdot Q_{t-1} + (1-CSS)(I_t - I_{t-1})/2$$

沟道泥沙演算式：

$$S_t = CS_0 \cdot Q_t + CS_1 \cdot Q_{t-1} + CS_2 \cdot S_{t-1}$$

$$CS_0 = (0.5\Delta t - KSG \cdot XS)/RR$$

$$CS_1 = (0.5\Delta t + KSG \cdot XS)/RR$$

$$CS_2 = 1 - CS_0 - CS_1$$

$$RR = 0.5\Delta t - KSG \cdot XS + KSG$$

式中，S 为河道出口输沙速率；KSG 为泥沙颗粒在河段中的平均传播时间；XS 为比重系数。

塔里木盆地陆面水文模式

姚德良，沈卫明，李家春：塔里木盆地陆面水文模式研究．生态学报，1995，15(2)

1. 水热交换模型结构

(1) θ_1,θ_2 运动方程：

$$d_1 \frac{d\theta_1}{dt} = \left(I_b - \frac{E_b}{e_w}\right)\sigma_b + (I_c - U_1)\sigma - q_{12} - R_{s1}$$

$$d_2 \frac{d\theta_2}{dt} = q_{12} - q_{23} - U_2 - R_{s2}$$

式中，I_b,I_c 分别为裸土及植被层下土壤表面的入渗率；U_1,U_2 为根系分别从表面层及深层向上的吸水速度；E_b 为蒸发率；R_{s1},R_{s2} 为第 1 层及第 2 层中的壤中流；q_{12},q_{23} 分别为第 1，2 层间和第 2，3 层间的水分通量；$\sigma_c(\sigma_b = 1-\sigma_c)$ 为植被的覆盖率。

(2) 各层温度的模型：

$$h_c C_c \frac{dT_c}{dt} = G_c$$

$$\alpha \frac{dT_{gb}}{dt} = \frac{2G_b}{C\bar{d}_1} - \frac{2\pi}{86\,400}\left(T_{gb} - \bar{T}\right)$$

$$\alpha \frac{dT_{gc}}{dt} = \frac{2G_{cb}}{C\bar{d}_1} - \frac{2\pi}{86\,400}\left(T_{gc} - \bar{T}\right)$$

$$\frac{d\bar{T}}{dt} = \frac{\sigma_c G_{cb} + \sigma_b G_b}{C\bar{d}_2}$$

式中，T_c 为植被温度；T_g 为地表层温度；$\bar{T}$ 为深层温度；G_b,G_{cb} 分别为进入裸土表面和植被下土壤表面的净热通量；G_c 为植被层单位时间吸收或放出的热能；h_c 为植被高度；C,C_c 分别为土壤热容和单位高度植被平均热容量；$\alpha = 1 + 2\varepsilon\delta/\bar{d}_1\,(0<\varepsilon<1)$；$\bar{d}_1 = [24\lambda/(\pi c)]^{1/2}$；$\bar{d}_2 = (365\pi)^{1/2}\bar{d}_1$；$\lambda$ 为热传导系数。

2. 净辐射、地表温度的计算方法

(1) 净辐射模型：

$$R_{nb} = S_w(1-\alpha_{lb})S_{lb}$$

$$R_{nc} = S_w(1-\alpha_{lc})S_{lc}$$

$$R_{ncb} = S_w \exp(-L_c X_c) S_{lcb}$$

式中，R_{nb},R_{nc},R_{ncb} 分别为裸土、植被及植被层下土壤的净辐射；S_W 为实际太阳总辐射；S_{lb},S_{lc},S_{lcb} 分别为裸土、植被及植被层下土壤的有效辐射量。

(2) 地表温度模型：

1) 晚上 0 点至日出加上 2h：

$$T_H = TN_{n-1} + (TX_{n-1} - TN_{n-1})\sin\alpha - \frac{[TN_{n-1} + (TX_{n-1} - TN_{n-1})\sin\alpha - TN_n](H + 24 - S_{n-1})}{24 - S_{n-1} + R_n + 2}$$

2) 日落时至晚上 0 点：

$$T_H = TN_n + (TX_n - TN_n)\sin\beta - \frac{[TN_n + (TX_n - TN_n)\sin\beta - TN_{n+1}](H - S_n)}{24 - S_n + R_{n+1} + 2}$$

3) 日出时间加上 2h 至日落时：

$$T_H = TN_n + (TX_n - TN_n)\sin\frac{\pi(H - R_n - 2)}{S_n - R_n}$$

式中，

$$\alpha = \frac{\pi(S_{n-1} - R_{n-1} - 2)}{S_{n-1} - R_{n-1}};\ \beta = \frac{\pi(S_n - R_n - 2)}{S_n - R_n};$$

TX_n,TN_n 分别为当天的最高和最低温度；TX_{n-1},TN_{n-1} 分别为前一天的最高和最低温度；TX_{n+1},TN_{n+1} 分别为下一天的最高和最低温度；R,S 分别为对应的日出和日落时间；H 为时间；T_H 为在 H 时间里的温度。

影响水土流失因子间量纲和谐模型

赵鸿雁，吴钦孝等：影响水土流失因子间量纲和谐的法则．水土保持通报，1995，15(2)

(1) 水土流失的系统容量模型：

$$V_{vm}=V_m/t$$
$$V_{ve}=V_e/t'$$

式中，V_{vm}为物质的容量速度；V_m为物质容量；t为系统容纳物质的始、终时间；V_{ve}为系统能量容量速率；V_e为系统容纳能量的量；t'为系统容纳能量的始、终时间。

(2) 影响水土流失因子间量纲和谐模型：

$$E=0.5(I-V_{vm})tbl\sin a+PSe_m$$

式中，E为水土流失的总动能；P为降水量；S为水土流失面积；e_m为每平方米降水的动能；t为降雨历时；b为坡面宽度；a为坡度；l为坡长。

国内小流域综合治理规划方法

李　靖，秦向阳，柳林旺：国内小流域综合治理规划方法刍议．水土保持通报，1995，15(3)

(1) 线性规划(LP)法——LP模型的一般形式：

目标函数：$\max f(x)=\sum_{j=1}^{n}c_jx_j$

约束条件：$\begin{cases}\sum_{j=1}^{n}a_{ij}x_j=b_j & (i=1,2,\cdots,m)\\ x_j\geqslant 0 & (j=1,2,\cdots,n)\end{cases}$

式中，n为决策变量个数；m为约束条件个数；x_j为决策变量；a_{ij}为常量系数，指生产单位数量产品所需某种生产要素投入量；c_j为效益系数，即第j种产品的单位收益；b_j为限制常量，指某种生产要素的限制量。

(2) 多目标规划法——多目标规划数学模型的一般形式：

$$(VP)\begin{cases}v-\min[f_1(x),\cdots,f_p(x)]^T\\ g_j(x)\geqslant 0\end{cases}$$

式中，$v-\min$表示对p个目标$[f_1(x),\cdots,f_p(x)]^T$求最小；$[f_1(x),\cdots,f_p(x)]^T$为p个目标函数；$x=[x_1,\cdots,x_n]^T$为一向量；g_i为m个约束条件。

(3) 非线性规划法——非线性规划的一般形式：

$$\begin{cases}\min f(x)\\ g_i(x)\geqslant 0 & (i=1,2,\cdots,m)\end{cases}$$

式中，$\min f(x)$表示对目标函数$f(x)$求最小；$g_i(x)$为m个约束方程；$f(x)$、$g_i(x)$至少有一个包含非线性关系；x为一向量，表示规划中的决策变量。

基于栅格数据的流域降雨径流模型

沈小东，王腊春，谢顺平：基于栅格数据的流域降雨径流模型．地理学报，1995，50(3)

(1) 栅格水量平衡方程：

$$(P_i)_{1-2}-0.5\Delta t\sum(COQ_{i1}+COQ_{i2})-(E_i)_{1-2}-0.5\Delta t(F_{i1}+F_{i2})-0.5\Delta t(Q_{i1}-Q_{i2})=S_{i2}+S_{i1}$$

$$0.5\Delta t(F_{i1}+F_{i2})+(P_i)_{1-2}+0.5\Delta t\sum(COGW_{i1}+COGW_{i2})-0.5\Delta t(F_{ci1}+F_{ci2})-(EW_i)_{1-2}-0.5\Delta t(GW_{i1}+GW_{i2})=W_{i2}-W_{i1}$$

式中，i为栅格编号；Δt为计算时段步长；1,2为时段始末；P为时段总降雨量；COQ为邻近栅格地表入流量；Q为本栅格地表出流量；$COGW$为近栅格地下入流量；GW为本栅格地下出流量；E为时段水面总蒸发量；EW为时段土壤总蒸发量；F为地表下渗率；Fc为深层下渗率；S为地表蓄水；W为地下上层含水量。

(2) 流量演算方程：

$$Q_{i2}=\frac{2\Delta t}{2k-\Delta t}(I)_{1-2}+\frac{2k-\Delta t}{2k-\Delta t}Q_{i1}$$
$$(I_i)_{1-2}=(P_i)_{1-2}+0.5\Delta t\sum(COQ_{i1}+COQ_{i2})-(E_i)_{1-2}-0.5\Delta t(F_{i1}+F_{i2})$$

$$GW_{i2}=\frac{2\Delta t}{2k_g+\Delta t}(GI_i)_{1-2}+\frac{2k_g-\Delta t}{2k_g+\Delta t}GW_{i1}$$

$$(GI_i)_{1-2}=0.5\Delta t(F_{i1}+F_{i2})+0.5\Delta t\sum(COGW_{i1}+COGW_{i2})-0.5\Delta t(F_{ci1}+F_{ci2})-(EW_i)_{1-2}$$

式中，k为地表蓄量系数，即水流通过一个栅格地表所需时间；k_g为地下蓄泄系数；I_i为时段栅格地表总输入；GI为时段栅格地下总输入。

(3) 下渗率和蒸发量计算公式：降雨最大下渗率的Holtan模型为：

$$f=FA\cdot GI\cdot\alpha\cdot S_a^n+f_c$$

包气带向深层上的下渗率为：

$$F_c=f_c\frac{W}{W_m}$$

时段水面总蒸发量为：

$$(E)_{1\sim2} = \Delta t E_{m}$$

时段土壤总蒸发量为：

$$(EW)_{1\sim2} = \frac{\Delta t W}{W_{m}} EW_{m}$$

式中，f 为下渗能力，即最大下渗率；GI 为作物生长指数，即日散发量与作物成熟期最大日散发量的比值；α 为由土地利用类型确定的植被指数，介于 0.2 到 0.8 之间；n 为结构参数，即 1.387；S_{a} 为土湿条件下包带最大缺水量，$S_{a}=0$ 时，土层稳渗；f_{c} 为稳渗率；W_{m} 为地下土层(包气带)田间持水量；FA 为适用于所有栅格的参数，解决 α 初值不准的误差；EW_{m} 为土壤蒸发率；E_{m} 为水面蒸发率。

(4) 蓄量系数 k 和蓄泄系数 k_{g}：

$$q_{0} = \frac{I+S}{\Delta t} Lcon\theta$$

$$y = aq_{0}^{m}$$

$$R_{e} = \frac{4q_{0}}{\mu}$$

$$f = \frac{96}{R_{e}}$$

$$v = \frac{q_{0}}{y}$$

$$k = \frac{2L}{v+v_{0}}$$

式中，q_{0} 为栅格地表出口单宽流量；L 为栅格边长；θ 为栅格坡度；y 为栅格出口下断面水深；R_{e} 为雷诺数；μ 为运动黏滞系数；f 为阻力因子；v 为栅格出口下断面流速；v_{0} 为栅格出口上断面流速；当 $R_{e}<2000$ 时，水流为层流，则 $m=\frac{2}{3}$，$a=\frac{f}{(8g\tan\theta)^{\frac{1}{3}}}$；当 $R_{e}\geqslant 2000$ 时，水流为紊流，$m=\frac{3}{5}$，$a=\frac{n^{0.6}}{(\tan\theta)^{0.3}}$，$n$ 为由土地类型确定的曼宁糙率。

(5) 约束条件：

$$S_{i2} \geqslant 0$$

$$0 \leqslant W_{i2} \leqslant W_{m}$$

$$0 \leqslant 0.5\Delta t(F_{i1}+F_{i2}) \leqslant (P_{i})_{1-2} + 0.5(S_{i1}+S_{i2})$$

式中，当 $Q>0$ 时，$F=f$。

两种理论方程的比较模型

雷阿林，张学东，唐克丽：几种计算水滴降落速度方法的比较．水土保持通报，1995，15(4)

(1) 直径大于 1.9mm 的水滴着地速度模型：

$$v = 4.80 \cdot \left[D\cdot\left(1-e^{-0.85H/D}\right)\right]^{0.5}$$

式中，v 为水滴着地速度；H 为水滴降落的初始高度；D 为水滴直径。

(2) 任意水滴降落运动方程：

$$\frac{d^{2}Z}{dt^{2}} = \frac{3C_{D}}{2D}\frac{\rho_{a}}{2\rho_{w}-\rho_{a}}\left(\frac{dZ}{dt}\right)^{2} - \frac{2(\rho_{w}-\rho_{a})}{2\rho_{w}-\rho_{a}} g$$

$$C_{D} = \frac{a}{R_{e}} + \frac{b}{R_{e}} + c$$

$$R_{e} = \frac{1}{\gamma_{a}} D \frac{dZ}{dt}$$

式中，ρ_{a} 为流体(空气)的密度；ρ_{w} 为水密度；C_{D} 为阻力系数；γ_{a} 为空气动黏性系数；R_{e} 为雷诺系数；a，b 和 c 为系数。

河型转化公式

许炯心，靳长兴：河漫滩地生态系统影响下的河型转化．地理学报，1995，50(4)

在双对数坐标中，游荡河型与弯曲河型的点据可以被直线分成两部分，直线以下的为非游荡河型，直线以上的为游荡河型。

$$B = 8.257Q_{b}^{0.541}$$

式中，Q_{b} 为平滩流量；B 为河宽。

滞后效应及其对 SPAC 中水流运动影响模型

黄明斌：滞后效应对 SPAC 中水流运动的影响研究评述．水土保持通报，1995，15(4)

(1) 滞后效应的数学模型：

1) $\psi-\theta$ 的数学模型：

$$\theta^{k+1} = \theta_{1} + \sum_{i=2}^{m} G(\theta_{i}')H_{i}$$

$$G(\theta) = \frac{\theta_{s}-\theta_{d}(h)}{[\theta_{s}-\theta_{d}(h)]^{2}}$$

$$H_{i} = [\theta_{s}-\theta_{w}(h_{i}')][\theta_{w}(h_{i})-\theta_{w}(h_{i-1})]$$

式中，θ_1 为转折点的含水量；i 为扫描图的序数；θ_i', h_i' 分别为扫描线中的最小含水量和相应的水势；$\theta_w(h)$ 为主吸湿线上相应于 h 的含水量；$\theta_d(h)$ 为主脱湿线上相应于 h 的含水量；θ_s 为饱和含水量。

2) $\psi_1 - E$ 的滞后模型：

$$\theta_{(t)} = \frac{\psi_B - \psi_1(t)}{R} + \frac{d}{dt}\left[C(\psi_B - \psi_1)\right]$$

式中，$\theta_{(t)}$ 为水流通量；ψ_B, ψ_1 为有效土壤水势和叶水势；R、C 为 SP 系统中水流阻力和水容；t 为时间。

(2) 滞后效应对 SPAC 内水流运动的影响：

土壤水分的一维运动方程：

$$C(h)\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K(h)\left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1\right)\right]$$

式中，$C(h)$ 为比水容量。

物质纵向输移公式

沈健、沈焕庭、潘定安等：长江河口最大浑浊带水沙输运机制分析 地理学报，1995，50(5)

(1) 单宽水体输移量(沿河道轴线单宽潮周期平均输水量)：

$$<Q> = \frac{1}{T}\int_0^T\int_0^T uh\,dz\,dt = \bar{u}_0 h_0 + <\bar{u}_t h_t>$$

(2) 瞬时悬沙输移量(单宽瞬时悬沙输移量为)：

$$\int_0^1 huc\,dz = h\bar{u}_0\bar{c}_0 + h\bar{u}_0\bar{c}_t + h\bar{u}_t\bar{c}_0 + h\bar{u}_t\bar{c}_t + h\overline{u_0'c'}_0 + h\overline{u_t'c'}_0 + h\overline{u_0'c_t'} + h\overline{u_t'c_t'}$$

(3) 单宽悬沙输移量(沿河槽轴线单宽悬沙输移量为)：

$$\frac{1}{T}\int_0^T\int_0^h huc\,dz\,dt = h_0\bar{u}_0\bar{c}_0 + <h_t\bar{u}_t>\bar{c}_0 + <h_t\bar{u}_t>\bar{c}_0 + <h_t\bar{u}_t\bar{c}_t> + h_0\overline{u_0'c_0'} + <h_t\overline{u_t'c_0'}> + <h_t\overline{u_0'c_t'}> + <h_t\overline{u_t'c_t'}>$$

式中，<>表示潮平均；$\bar{u}_0 h_0$ 为平均流项；$<\bar{u}_t h_t>$ 为潮汐和潮流相关项，也称斯托克斯漂移效应；T 为潮周期；x 为纵向坐标；t 为时间变量；z 为相对水深 $(0 \leqslant z \leqslant 1)$；若不计流速脉动项，瞬时流速 $u(x,z,t)$ 可分解成垂向平均量项及其偏差项之和，即，$u = \bar{u} + u'$；$\bar{u}$ 和 u' 又可分解成潮平均量和潮变化项之和，即，$\bar{u} = \bar{u}_0 + \bar{u}_t$；$u' = u_0' + u_t'$；同理，悬沙量 $c(x,z,t)$ 可分解为 $c = \bar{c}_0 + \bar{c}_t + c_0' + c_t'$；水深 $h(x,t)$ 可分解为 $h = h_0 + h_t$。

泥沙解吸重金属污染物动力学模式

黄岁樑：泥沙解吸重金属污染物动力学模式研究 地理学报，1995，50(6)

1. 平衡吸附试验结果：不同粒径泥沙不论单独存在还是共存吸附，均服从兰格茂尔等温式：

$$N_\infty = b\frac{c_\infty}{k + c_\infty}$$

式中，N_∞ 为单位重量泥沙平衡吸附量；c_∞ 为水相平衡浓度；b 为饱和吸附量；k 为吸附-解析率常数。

2. 不同粒径泥沙单独存在解吸动力学公式可用一组方程来描述：

(1) 兰格茂尔吸附动力学方程：

$$\frac{dN}{dt} = k_1 c(b - N) - k_2 N$$

(2) 反应器内质量守衡方程：

$$Nsv - cv = N_0 sv + c_0 v = Av$$

(3) 初时条件：

$$N|_{t=0} = N_0 \quad ; \quad c|_{t=0} = c_0$$

式中，N 为单位泥沙剩余吸附量；c 为水相浓度；N_0 为单位重量泥沙初始重金属吸附量；v 为反应器内水溶液的体积；k_1 为吸附速率系数；k_2 为解吸速率系数；b 为饱和吸附量；s 为悬浮泥沙浓度；t 为时间；c_0 为初始水相浓度。

3. 不同粒径泥沙共存解吸动力学公式：

$$N = \sum_{i=1}^{n}\frac{s_i}{s}N_{i0}$$

式中，N，s 分别表示不同粒径泥沙共同体系中单位重量泥沙的剩余吸附量和悬浮泥沙浓度；N_{i0} 为第 i 组粒径泥沙单度存在(悬浮泥沙浓度为 s_i)相同条件下单位重量的剩余吸附量；n 为粒径分组数。

冰川作用流域能水平衡的径流模拟计算公式

康尔泗：冰川作用流域能水平衡的径流模拟计算 地理学报，1995，50(6)

$$R = \frac{\tau}{L_m}(H_{NR} + H_s) - \frac{L_E}{L_m}E + P_L$$

式中，R 为径流量(mm)；τ 为计算时段；L_m 为冰雪融化潜热；H_{NR} 为净辐射($W \cdot m^{-2}$)；H_s 为感热通量($W \cdot m^{-2}$)；L_E 为蒸发潜热；E 为蒸发量 (mm)；P_L 为液态降水(mm)

IHACRES 模型

Post D A, Jakeman A J, Littlewood I G et al：水文反应中模拟地表下渗变化 Picaninny Creek, Victoria Ecological Modelling, 1996, 86

IHACRES 是一个 UH 降水径流模型，它在集水处被汇集。集水储存的集水地降雨指数 s_k 被计算，它依赖于先前的降雨量和集水地干旱度而在 0 和 1 之间变化。0 表明集水地是干旱的，目前的降水会产生有效雨量；1 表明集水地是饱和的，目前的所有的降水会变成有效径流。

$$s_k = c(r_k - u_k) + \left[1 - \frac{1}{\tau_w(t_k)}\right]s_{k-1}$$

式中，c 非线性存储的最大容积；r_k 是在第 k 时间段的实际降水；u_k 是有效雨量；$\tau_w(t_k)$ 是温度 t_k 时集水地烘干的时间常数。根据：

$$\tau_w(t_k) = \tau_w \exp(20f - t_k f)$$

式中，τ_w 是 20℃时集水地烘干的时间常数；f 是描述温度变化对烘干速率影响的因子。

有效雨量 u_k 的计算如下：

$$u_k = \frac{1}{2}(s_k + s_{k-1})r_k$$

小流域水土保持综合治理优化规划模型

许志云：浅谈小流域水土保持综合治理优化规划问题．水土保持通报，1996，16(1)

(1) 小流域综合治理优化规划模型：净效益最大 $\max F_1(X,Y,T,G)$ 模型：

$$\max F_1(X,Y,T,G) = \sum f_1(X_{ij},Y_{ij}) + \sum f_1(T_k) + \sum f_1(G_k)$$

(2) 蓄水效益最大—— $\max F_2(X,Y,T,G)$ 模型：

$$\max F_2(X,Y,T,G) = \sum f_2(X_{ij},Y_{ij}) + \sum f_2(T_k) + \sum f_2(G_k)$$

(3) 保土效益最大—— $\max F_3(X,Y,T,G)$ 模型：

$$\max F_3(X,Y,T,G) = \sum f_3(X_{ij},Y_{ij}) + \sum f_3(T_k) + \sum f_3(G_k)$$

(4) 林草覆盖面积(生态效益)最大 $\max F_4(x)$ 模型：

$$\max F_4(x) = \sum X_{ij}$$

式中，$f_1(X_{ij},Y_{ij})$、$f_2(X_{ij},Y_{ij})$、$f_3(X_{ij},Y_{ij})$ 分别为第 i 地块中第 j 种措施的净效益函数、蓄水函数和保土函数；$f_1(T_k)$、$f_2(T_k)$ 和 $f_3(T_k)$ 分别为第 k 座塘坝的净效益函数、蓄水函数和保土函数；$f_1(G_k)$，$f_2(G_k)$ 和 $f_3(G_k)$ 分别为第 k 座谷坊的净效益函数、蓄水函数和保土函数。

水土保持规划中的系统动力学模型

张汉雄：系统动力学在水土保持规划中的应用．水土保持通报，1996，16(1)

(1) 功效系数模型：

$$R_i = \sqrt[m]{\prod_{j=1}^{m} a_{ij}}$$

$$(i = 1,2,\cdots,n;\quad j = 1,2,\cdots,m)$$

式中，R_i 为第 i 个因子的功效系数；a_{ij} 为第 i 个因子第 j 个指标的评审系数；$\prod$ 为连乘符号；n 为评价因子数；m 为评价指标数

(2) 权系数法模型：

$$D = \sum_{i=1}^{n} d_i R_i \qquad (i = 1,2,\cdots,n)$$

式中，D 为总体功效系数；d_i 为权重。

沙地草地土壤水分平衡模型

高琼，董学军，梁宁：基于土壤水分平衡的沙地草地最优植被覆盖率的研究．生态学报，1996，16(1)

瞬时的土壤水分动态方程：

$$W = P(t)[\lambda_v(a)C + \lambda_s(a)(1-C)] - CL_{ai}(t)E(t) - g(C,r,W,a)$$

式中，$P(t)$，$E(t)$ 分别为降水和叶面积指数为 1 时的可能蒸腾强度；$g(C,r,W,a)$ 为地下潜流；λ_v，λ_s 分别为植被覆盖部分地表和无植被覆盖部分地表的入渗系数；a 为坡度；C 为地表的植被覆盖率；$L_{ai}(t)$ 为植被覆盖率为 1.0 时的叶面及指数；$CL_{ai}(t)E(t)$ 为实际蒸腾强度。

湖流模型

关润方，沈良标，朱光熙：东洞庭湖湖流及风力影响分析，地理学报，1996，51(1)

$$
\begin{cases}
\dfrac{\partial h}{\partial t}+\dfrac{\partial uh}{\partial x}+\dfrac{\partial vh}{\partial y}=0 \\
\dfrac{\partial u}{\partial t}+u\dfrac{\partial u}{\partial x}+v\dfrac{\partial u}{\partial y}+g\dfrac{\partial(h+h_b)}{\partial x}= \\
\dfrac{\tau_{sx}}{\rho h}-\dfrac{g\sqrt{u^2+v^2}}{C^2h}u+fv \\
\dfrac{\partial v}{\partial t}+u\dfrac{\partial v}{\partial x}+v\dfrac{\partial v}{\partial y}+g\dfrac{\partial(h+h_b)}{\partial y}= \\
\dfrac{\tau_{sy}}{\rho h}-\dfrac{g\sqrt{u^2+v^2}}{C^2h}v-fv
\end{cases}
$$

式中，h 为水深；h_b 为湖床高程；u 为 x 方向的水流速度；v 为 y 方向的水流速度；g 为重力加速度；ρ 为水的密度(ρ=1000kg·m^{-3})；f 为 Coriolis 参数($f=2\omega\sin\phi$)，ω 为地球旋转角速度($\omega=2\pi/3600\times24$(s^{-1}))，ϕ 是纬度(ϕ=29°)；C 为谢才参数($C=\frac{1}{\eta}h^{\frac{1}{6}}$)，$\eta$ 为湖床糙率；τ_{sx}，τ_{sy} 为水面风应力，$\tau_{sx}=\gamma^2\rho_a W^2\cos\theta$，$\tau_{sy}=\gamma^2\rho_a W^2\sin\theta$，$\rho_a$ 为空气密度(1.29kg·m^{-3})，θ 为风的方向角(等于 135°)，γ 为风应力系数(γ^2=0.0026)，W 为风速(W=6m·s^{-1}(四级风)，9m·s^{-1}(五级风)，12m·s^{-1}(六级风))。

降水推算方程

王菱：华北山区年降水量的推算和分布特征，地理学报，1996，51(2)

$$R=f(\psi,\lambda,h,h-h_0,G)$$

式中，ψ，λ 和 h 分别为宏观地理因素纬度、经度和海拔高度；$h-h_0$ 为相对海拔高度；G 为地形因素(包括坡度和坡向方位等)。

坡度与坡面侵蚀的关系模型

靳长兴：坡度在坡面侵蚀中的作用，地理研究，1996，15(3)

(1) 侵蚀与坡度关系式：

$$S\propto X^a\tan^b\beta$$

式中，S 为侵蚀量；X 为坡长；β 为坡度；a，b 为常数。

(2) 累计入渗量与地表坡度关系式：

$$F=\frac{\beta}{b\beta-a}$$

式中，F 为累计入渗量；β 为坡度；a，b 为常数。

(3) 坡面流速与坡度的关系式：

$$V=a\sqrt{2gk^{-b}h^{0.5+b}S^{0.5}}$$

式中，
$$b=\begin{cases}1/8 & (40<h/k<5\times10^4)\\ 1/6 & (10<h/k<100)\\ 1/2 & (1<h/k<10)\\ 1 & (1/2<h/k<2)\end{cases};$$

V 为流速；g 为重力加速度；k 为大于等于 84% 的床面颗粒的粒径；h 为水深；S 为坡度；a、b 为常数。

(4) 坡面水流的能量计算公式：

$$E_v=\frac{1}{2}\rho\left(2ga^2\right)^{\frac{1}{1.5+b}}k^{-\frac{2b}{1.5+b}}\times q^{\frac{2.5+3b}{1.5+b}}\sin^{\frac{1}{1.5+b}}\beta\cos^2\beta$$

式中，E_v 为坡面水流具有的能量；ρ 为水的密度；q 为单宽流量。

(5) 坡面侵蚀的临界坡度计算式：

$$\beta=\arctan\left(\frac{1}{3+2b}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\beta=\begin{cases}29° & (40<h/k<5\times10^4)\\ 28.7° & (10<h/k<100)\\ 26.6° & (1<h/k<10)\\ 24.1° & (1/2<h/k<2)\end{cases}$$

式中，β 为临界坡度。

风蚀水蚀交错带侵蚀能量特征模型

高学田，唐克丽：风蚀水蚀交错带侵蚀能量特征，水土保持通报，1996，16(3)

(1) 风蚀能量的计算模型：

$$C=\sum_{i=1}^{12}\left(\rho V_i^2\frac{E_i-P_i}{E_i}D_i\right)$$

式中，C 为风蚀能，实际为单位体积的风蚀能，对于地表来说，则为单位面积上的侵蚀能；ρ 为大气密度；V_i 为月平均风速；E_i 为月平均蒸发量；P_i 为月平均降水量；D_i 为月天数。

(2) 雨侵蚀能量的计算模型：

$$R = Ped$$

式中，R 为降雨侵蚀量；e 为单位雨量的动能；P 为年汛期降水量的多年平均值；d 为降雨历时。

(3) 地形附加侵蚀能量 E_g 模型：

$$E_g = mgHS$$

式中，m 为质量；g 为重力加速度；H 为地面切割深度；S 为土壤侵蚀面积率。

含沙量传感器

孙超图，解建宝，李占斌：全沙含量在线监测实验研究．水土保持通报，1996，16(3)

无气泡情况下，称重器中水流的含沙量 S 模型：

$$S = \frac{\gamma_s (W_h - W_g)}{V(\gamma_s - \gamma_g)}$$

$$W_g = \varphi(U_0)$$

$$W_h = \varphi(U_h)$$

式中，γ_s 为泥沙重度；γ_g 为清水重度；V 为称重器体积；W_g 为称重器体积充满清水时的重量；W_h 为称重器体积充满浑水时的重量；U_0 为充满清水时的输出电压；U_h 为充满某含沙浑水时的输出电压。

苏北低地系统响应

陈晓玲，王腊春，朱大奎：苏北低地系统及其对海平面上升的复杂响应．地理学报，1996，51(4)

(1) 一维浅水波方程：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial F(u)}{\partial x} = H(u)$$

式中，x 轴沿河流流向为正方向；H 为床底高程；$u = \begin{pmatrix} h \\ hv \end{pmatrix}$，$h$ 为水深，v 为流速；$F(u) = \begin{pmatrix} 0 \\ -\left[\mu(v) + g\dfrac{\partial H}{\partial x}\right] \end{pmatrix}$，$g$ 为重力加速度，$\mu(v)$ 为运动黏性系数。初始条件为 $t_0 = 0$；边界条件为 $\begin{cases} h(0,t) = h_0(t) \\ v(0,t) = v_0(t) \end{cases}$ 和 $\begin{cases} h(L,t) = h_L(t) \\ v(L,t) = v_L(t) \end{cases}$。

(2) 系统响应的面状传播：

$$dQ = V_1 dt - V_2 dt - V_r dt - I_{max}$$

式中，$Q(t)$ 某单元内在时刻 t 的水量；dQ 为经过时间 dt 后水量的增加；V_1 为入流速率；V_2 为出流速率；V_r 为蒸发速率；I_{max} 为土壤最大初渗值

水文线性模型

邓慧平，张翼，唐来华：[illegible]日流量[illegible]去探讨．地理学报，1996，[illegible]

$$R(t) = R_t(t) + R_s(t) + R_w(t) + R_p(t) + R_r(t)$$

式中，R 为日流量；R_t 为趋势项；$R_s(t) = \bar{R} \cdot C_1 \sin(\pi t / L + \varphi_1)$ 为季节周期项，$\bar{R}$ 为年平均流量 $(m^3 \cdot s^{-1})$，C_1 为年波振幅，φ_1 为年波初始位相；R_w 为由涨水和退水构成的波动；R_p 为短期持续项；R_r 为随机项；t 为时间变量

水资源变化趋势预测模型

郁海香，金蓉玲：[illegible]．自然资源，1997，1

(1) 回归法模型：

$$W_t = a + bt$$

式中，W_t 为水资源消耗量；a、b 为待定常数

(2) 灰色法模型：

$$\hat{X}_{t+1}^{(1)} = \left[X_1^{(0)} - \frac{u}{a}\right]e^{-at} + \frac{u}{a}$$

黄河下游泥沙淤积的经验统计关系式

许炯心：黄河下游泥沙淤积的经验统计关系．地理研究，1997，16(1)

1. 冲淤量与来水来沙量的年系列关系式

(1) 全下游冲淤量和三黑小汛期、非汛期水量、沙量的关系：

$$Dep[s-1] = 4.75 + 0.475SHX_{sh} + 0.606SHX_{sl} - 0.0189SHX_{wh} - 0.0235SHX_{wl}$$

式中，$Dep[s-1]$ 为三门峡-利津年冲淤量；SHX 表示三门峡、黑石关小董(简称三黑小)；w 为水量；s 为沙量；h 为汛期；l 为非汛期。

(2) 下游冲淤量和三黑小平均含沙量的关系：

$$Dep[s-1] = -4.23 + 0.205SHX_{con}$$
$$(r = 0.878, n = 40)$$

式中，SHX_{con} 为三黑小平均含沙量；n 为总年数。

(3) 下游冲淤量和三黑小和来沙系数的关系：

$$Dep[s-1] = -20.7 + 4.77SHX_c$$

$$(r = 0.899, n = 40)$$

式中，SHX_c 为三黑小来沙系数。

2. 冲淤量与来水来沙量的洪水系列关系式

(1) 全下游冲淤量与来水来沙关系：

$$Dep[s-1] = -540 - 219Q_w + 0.648Q_s$$

式中，Q_w 为水总量；Q_s 为来沙总量。

(2) 洪水冲淤强度计算公式：

$$I_f = -107 - 26.6Q_w + 0.067Q_s + 73.0Q_{max}/Q_{mean} + 4.17C_{max}/C_{mean}$$

式中，I_f 为洪水冲淤强度；Q_{max}/Q_{mean} 为历次洪水中流量变幅；C_{max}/C_{mean} 为含沙量变幅。

(3) 下游河道淤积量与三门峡最大含沙量的关系：

$$Dep[s-1] = -4583 + 65.4C_{max}$$

式中，C_{max} 为三门峡最大含沙量；n 为所研究的洪水次数。

(4) 洪水冲淤强度与三门峡最大含沙量的关系：

$$I_f = -473 + 7.11C_{max}$$

$$(r = 0.876, n = 145)$$

3. 来沙组成的影响

(1) 三门峡至利津全沙年冲淤量与大于 0.05 mm 粗泥沙的关系式：

$$Dep[s-1]_t = 1.74 + 0.448SHX_{st} - 0.017SHX_{wt} + 13.9R_{>0.05}$$

式中，$Dep[s-1]_t$ 为三门峡至利津全沙年冲淤量；$R_{>0.05}$ 为来沙中大于 0.05 mm 泥沙站三黑小总来沙的比率；SHX_{st}，SHX_{wt} 分别为三黑小年沙量和年水量。

(2) 三门峡至利津间粒径大于 0.05 mm 粗泥沙的年冲淤量计算公式：

$$Dep[s-1]_{>0.05} = 1.29 - 0.00570SHX_{wt} + 0.842SHX_{s>0.05}$$

式中，$Dep[s-1]_{>0.05}$ 为三门峡至利津间粒径大于 0.05 mm 粗泥沙的年冲淤量；$SHX_{s>0.05}$ 为三黑小粒径大于 0.05 mm 的粗泥沙来量。

(3) 三门峡至利津全沙年冲淤量与粒径小于 0.025mm 泥沙的关系式：

$$Dep[s-1]_t = 10.9 + 0.43SHX_{st} - 0.0176SHX_{wt} - 11.3R_{<0.025}$$

式中，$R_{<0.025}$ 为来沙中粒径小于 0.025mm 泥沙在三黑小总来沙中所占的比率。

(4) 三门峡至利津全沙年冲淤量与粒径为 0.025~ 0.05mm 泥沙的关系式：

$$Dep[s-1]_t = 2.73 + 0.497SHX_{st} - 0.0198SHX_{wt} + 10.7R_{0.025\sim0.05}$$

式中，$R_{0.025\sim0.05}$ 为来沙中粒径为 0.025~ 0.05 mm 泥沙在三黑小总来沙中所占的比率。

(5) 粒径小于 0.025mm 泥沙的冲淤量与来沙量的关系式：

$$Dep[s-1]_{<0.025} = 3.75 - 0.0115SHX_{wt} + 0.425SHX_{s<0.025}$$

式中，$Dep[s-1]_{<0.025}$ 为三门峡至利津间粒径小于 0.025 mm 泥沙的冲淤量；$SHX_{s<0.025}$ 为三黑小粒径小于 0.025 mm 泥沙的来量。

(6) 粒径为 0.05～0.025 mm 之间的泥沙冲淤量与来沙量的关系式：

$$Dep[s-1]_{0.05\sim0.025} = 0.329 - 0.00224SHX_{wt} + 0.0262SHX_{s0.05\sim0.025}$$

式中，$Dep[s-1]_{0.05\sim0.025}$ 为三门峡至利津间粒径为 0.05~0.025mm 泥沙的冲淤量；$SHX_{s0.05\sim0.025}$ 为三黑小粒径为 0.05~0.025mm 泥沙的来量。

4. 清水基流的影响

(1) 三门峡至利津淤积量和洪水冲淤强度与来水量和来沙量以及河口镇以上来水占三黑小总水量的比率关系式 ：

$$Dep[s-1] = -437 - 219Q_w + 0.674Q_s - 218R_{hekou}$$

$$I_f = 117 - 26.6Q_w + 0.067Q_s - 55R_{hekou}$$

式中，R_{hekou} 为河口镇以上来水占三黑小总水量的比率。

(2) 下游冲淤量和洪水冲淤强度与总来沙量以及河口镇以上清水来量关系式 ：

$$Dep[s-1] = -2214 + 0.563Q_s - 227H_w$$

$$I_f = 142 + 0.0577Q_s + 25.4H_w$$

式中，H_w 为河口镇以上来水量。

黄淮海地区土壤水分动态模拟模型

林耀明：黄淮海地区土壤水分动态模拟模型 自然资源学报，1997，12(1)

$$\Delta M = P + R - Q_S - Eta - \eta$$

式中，ΔM 为根区 1 m 内水分蓄变量(mm)；P 为平衡期内降水量(mm)；R 为平衡期内综合补给水量(mm)，相当于 $Q_{uc}+Q_{si}-I_1+I_2+I_3$，$Q_{uc}$ 为毛管上升水量，Q_{si} 为天然地表水的流入量，I_1、I_2 为干渠以及干渠以外的入渗量，I_3 灌溉入流量；Q_S 为由降水而产生地表径流量(mm)；Eta 为作物实耗水量(mm)；η 为平衡误差项(mm)。

本模型要求 Eta 符合下面的情况：

$$Eta = \begin{cases} Et & (\Delta M \geqslant 0) \\ P + R - \Delta M - Q_S & (\Delta M < 0) \end{cases}$$

相似度指标

崔明远：环套理论在找水中的应用 自然资源，1997，2

$$S_m(A,B) \overset{\Delta}{=} \frac{\sum_{i=1}^{k} \mu_m(V_i)\mu_a(V_i)\mu_b(V_i)}{\sum_{i=1}^{k} \mu_m(V_i)}$$

$$\mu_m(V_i) = \frac{1}{1+\alpha|a-b|}$$

式中，$\mu_m(V_i)$ 为 V_i 对 m 的隶属度；$\mu_a(V_i)$、$\mu_b(V_i)$ 分别为 A、B 对因素 V_i 的满足程度；a 为实测值；b 为标准值；α 为经验系数。

小流域降雨侵蚀产沙模型

田守荫，于立芬：山丘区小流域降雨侵蚀及产沙模型研究 水土保持通报，1997，17(2)

(1) 降雨侵蚀力 R 模型：

$$R = \sum E \cdot I_{30}$$

式中，$\sum E$ 为一次降雨的总动能；I_{30} 为一次降雨中最大 30min 的降雨强度。

(2) 土壤流失方程：

$$M = AR^{a}$$

式中，M 为土壤侵蚀模数；A 表示坡面相对抗冲性的综合参数；R 为降雨侵蚀力；a 为指数。

水资源财富代际转移模型

姜文来，王华东：水资源资产均衡代际转移研究 自然资源，1997，2

(1) 每代转移给下一代的水资源财富价值量 M_a 模型：

$$M_a = P_a(S_{a-1} - C_a + S_{a-1}R_a)$$

式中，P_a 为水资源的价格；S_{a-1} 为水资源开采后第 $a-1$ 代的水资源存量；C_a 为每代水资源开采量；R_a 为水资源的再生速率。

(2) 财富转移系数 μ 模型：

$$P_{a-1}(S_{a-2} - C_{a-1} + S_{a-2}R_{a-1}) - \mu = \frac{P_a(S_{a-1} - C_a + S_{a-1}R_a)}{W_a + \gamma_a K_a + P_a C_a}$$

式中，W_a 为工资量；γ_a 为利息率；K_a 为资本

河流纵剖面与相应坡降的关系模型

金德生，陈浩，郭庆伍：河道纵剖面分形-非线性形态特征 地理学报，1997，52(2)

按不同基准长度：

r (=1,2,5,10,20,50,100,200，500km)逐个量计剖面曲线，获得一系列量计次数 $N(r)$ 则，可得分维数：

$$D = -\frac{\ln N(r)}{\ln r}$$

长江中、下游各大河段、及黄河下游各大河段的纵剖面分维数 D 与相应坡降 J 的关系可表达为：

$$D - 1.3877e^{-0.1567J}$$

长江水系沉积物重金属含量变异函数

张朝生，章升，何建邦：长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究 地理学报，1997，52(2)

$$\gamma(h) = \frac{1}{2}E[Z(x) - Z(x,h)]^2$$

式中，h 为距离滞后(distance lag)；E 表示数学期望；$Z(x)$ 为在位置 x 处的变量值；$Z(x,h)$ 为在位置 x 偏离 h 处的变量值。

其离散形式可表达为：

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2$$

式中，$N(h)$ 为距离等于 h 的点对数；$Z(x_i)$ 为处于点 x_i 变量的实测值；$Z(x_i+h)$ 为与点 x_i 偏离 h 变量的实测

值

侵蚀产沙系统模型

郁丽英，范荣生：侵蚀产沙系统模型概述．水土保持通报，1997，17(2)

(1) 地表径流演算——平面径流的运动波方程：

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial q}{\partial x}=i-f$$

$$q=kh^{3/2}$$

式中，h 为当地水深；t 为时间；q 为单宽流量；x 为平面向下的距离；i 为降雨强度；f 为入渗率；k 为深度-流量系数。

(2) 流域侵蚀产沙模型——坡地动态侵蚀模型的连续方程：

$$\frac{\partial q_s}{\partial x}+\rho_s\frac{\partial (cy)}{\partial t}=D_r+D_l$$

式中，D_r 为细沟侵蚀率；D_l 为沟间泥沙输移率；q_s 为单宽输沙率；ρ_s 为泥沙颗粒密度；c 为水流泥沙浓度；y 为径流深。

(3) 泥沙的演进——泥沙平衡方程：

$$\frac{dw_s}{dt}=I_s-O_s+q$$

$$q=a(CI_*-CI)I+(1-a)(C_*-C)Q$$

式中，I_s，O_s 为泥沙的输入、输出速率；W_s 为随水流运动的泥沙总量；q 为冲淤速率，I，Q 为河段的入、出流流量，CI，C 为河段的入、出流含沙量，CI_*、C_* 为入、出流断面的挟沙能力，a 为常系数。

长江水情的数值模式

朱加虎，黄群：三峡工程对鄱阳湖水位影响研究．自然资源学报，1997，12(3)

通过数值求解 Saint Venant 方程组，建立描述长江水情的数值模式。

(1) 基础方程式：

$$\frac{\partial z}{\partial t}+\frac{1}{B}\frac{\partial Q}{\partial x}=0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{A}\right)+gA\left(\frac{\partial z}{\partial x}+\frac{Q|Q|}{K^2}\right)=0$$

式中，z 为水位(m)；B 为河宽(m)；Q 为流量($m^3\cdot s^{-1}$)；t 为时间(s)；g 为重力加速度($m^2\cdot s^{-1}$)；A 为过水断面面积(m^2)；K 为阻抗模数；x 为河口方向的横坐标。

(2) 边界条件：

①上游边界取长江宜昌站流量过程，$Q=Q(t)$；②下游边界取长江大通站水位流量关系，$Q=Q(z)$；③在长江干流与较大支流(清江、松滋口、太平口、藕池口、洞庭湖口、汉江和鄱阳湖口)的交界处，根据内部边界的连续和能量守恒条件，有：

$$Q_{j+1}=Q_j+Q_b$$

$$\Delta z_{j+1}=\Delta z_j$$

(3) 预测计算：

应用 Preissmann 隐式格式对基本方程组进行数值离散，取 θ 表示格式的参数，建立描述长江水情的数值模式。计算时将宜昌至大通江段分为 32 个断面，取 $\theta=0.65$，时间步长 $\Delta t=1h$。

供水约束方程

陈友媛，周章超：应用水资源管理模拟模型研究 2000 年乌鲁木齐河流域供水方案．地理研究，1997，16(2)

$$\sum_{L=1}^{n}R_{i,L,t}=\begin{cases}\sum\limits_{L=1}^{n}W_{i,L,t} & \left(0<\sum\limits_{L=1}^{n}W_{i,L,t}<\sum\limits_{j=1}^{2}U_{i,j,t}\right)\\[2ex] \sum\limits_{j=1}^{2}U_{i,j,t}+x_1\left(\sum\limits_{L=1}^{n}W_{i,L,t}-\sum\limits_{j=1}^{2}U_{i,j,t}\right) & \left(\sum\limits_{j=1}^{2}U_{i,j,t}<\sum\limits_{L=1}^{n}W_{i,L,t}\right.\\ & \left.\sum\limits_{L=1}^{n}W_{i,L,t}-\sum\limits_{j=1}^{2}U_{i,j,t}<U_{i,3,t}\right)\\[2ex] \sum\limits_{j=1}^{2}U_{i,j,t}+x_2U_{i,3,t} & \left(\sum\limits_{j=1}^{2}U_{i,j,t}<\sum\limits_{L=1}^{n}W_{i,L,t}\right.\\ & \left.\sum\limits_{L=1}^{n}W_{i,L,t}-\sum\limits_{j=1}^{2}U_{i,j,t}>U_{i,3,t}\right)\\[2ex] V_{i,L,t}=V_{i,L,t_{\max}} & \left(\sum\limits_{L=1}^{n}W_{i,L,t}>\sum\limits_{j=1}^{2}U_{i,j,t}+\sum\limits_{L=1}^{n}\left(V_{i,L,t_{\max}}-V_{i,L,t_{\min}}\right)\right)\end{cases}$$

集水技术与林木生长的土壤水环境模型

王百田，王斌瑞等：集水技术与林木生长的土壤水环境研究．水土保持通报，1997，17(6)

(1) 集水技术与有效集水量：

集水区的降雨径流过程模型：

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial q}{\partial x}=r-f$$

$$q=ah^m$$

$$a=\sqrt{\frac{\sin\theta}{n}}$$

式中，q为坡面末端的单宽流量；h为坡面末端的径流深；r为有效降雨强度；f为土壤的入渗强度；a，m为参数；t为时间；x为坡长；θ为坡度；n为糙度。

(2) 径流的入渗与蓄积：

土壤入渗力模型：

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left[D(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial t}-K(\theta)\right]$$

$$\theta(z,0)=\theta_0$$

$$\theta(0,t)=\theta_s$$

式中，θ为土壤含水量；t为时间；z为土层深；θ_0为初始土壤含水率；θ_s为饱和土壤含水率；$D(\theta)$为土壤水分扩散率；$K(\theta)$为土壤非饱和导水率。

(3) 水分消耗：

土壤水分动态过程模型：

$$WP_{t+1}=(\sum W_{Ht}+W_t)\,e^{-kt}$$

式中，W_t为时段末土壤含水量；W_H为土壤水分有效供给量；e^{-kt}为土壤水分消退系数，反映了土壤水分消耗的速度；t为时段；p为降雨量。

(4) 水量平衡与水分利用潜力：

利用区：$P+R=E_b-T\pm\Delta W$

集水区：$P-R=E_c\pm\Delta W$

全林区：$P=T+E\pm\Delta W$

式中，P为降雨量；R为地表径流量；E_b为植树带土壤蒸发量；E_c为集水面土壤蒸发量；ΔW为土壤水分储存量。

雨水集流面模型

张光辉，陈致汉：雨水集流用水窖的主要类型及其效益，水土保持通报，1997，17(6)

$$R_p\cdot\sum_{i=1}^{n}A_i\cdot\eta_i=W_d$$

式中，A_i为某种集流面的面积；η_i为该种集流面的全年集流效率；R_p为对应于某一频率的全年降雨量；W_d为全年蓄水量。

黄河下游引黄灌区水价域水资源调控模式

任鸿遵，唐登银：黄河下游引黄灌区水价域水资源调控 地理研究，1998，17(1)

(1) 黄河供水成本计算公式：

$$T_c=\left(\sum_{i=1}^{6}C_i\right)\frac{K_i}{Qr}$$

式中，T_c为供水成本；Q为年引水量；r为渠系利用系数；K_i为折现系数；C_i为供水成本中所包括的各项费用，C_1为水利工程的折旧费，C_2为工程的运营管理费，C_3为水资源费，C_4为清淤费，C_5为沉沙地区扶持生产生活费，C_6为排水系统工程建设费。

(2) 地表水与地下水合理调控目标函数：

$$F=\min\sum_{i=1}^{n}K_i(G_iC_1+S_iC_2)$$

式中，i为时段；K_i为资金折现率；G_i为第i时段地下水提取量；C_1为提取单位体积地下水的运行费；S_i为第i时段地表水提取量；C_2为引用单位体积地表水的运行费用。

(3) 水价与用水量关系式：

$$Q_2=Q_1\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^E$$

式中，Q_1，Q_2分别为原用水量与现用水量；P_1，P_2分别为原水价与现水价；E为价格弹性系数，小于1。

坡面措施减水减沙效益计算模型

吴永红，李倬，冉大川等：水土保持坡面措施减水减沙效益计算方法探讨，水土保持通报，1998，18(1)

(1) 坡面措施减水减沙效益计算：

梯田减洪量计算模型：

$$M_{减}=(1-\beta)A+\beta B$$

式中，$M_{减}$为梯田小区的减洪量；β为梯田有埂率；A为无埂梯田减洪量；B为有埂梯田减洪量。

(2) 流域大面积坡面措施减洪减沙量计算：

1) 减洪量计算模型：

$$W_{流域}=W_{小区}F^n_{流域}$$

式中，$W_{流域}$，$W_{小区}$分别为单项措施在流域和小区的减洪量；F为流域面积，当$F<3000\,km^2$时，$n\approx0.987$；当$F>3000\,km^2$时，$n\approx0.797$。

2）流域减沙量计算模型：

设各支流治理前的洪水泥沙关系式为 $W_{HS}=KW_H^{\alpha}$，K 为系数，α 为指数，则“逐步逼近法”计算公式为：

$$(W_{HS})_n = k\left[W_H + (n-1)\sum_{i=1}^{4}\Delta W_{Hi}^{\alpha}\right]$$

$$\sum_{i=1}^{4}\Delta W_{HSi} = (W_{HS})_n - (W_{HS})_{n-1}$$

式中，$\sum_{i=1}^{4}\Delta W_{HSi}$ 为四大水保措施（梯、林、草、坝）总减沙量；$\sum_{i=1}^{4}\Delta W_{Hi}$ 为四大水保措施总减洪量；W_H 为某支流计算效益年份实测洪水量；W_{HS} 为某支流计算效益年份计算洪沙量；n 为试算次数。

根据 $\sum_{i=1}^{4}\Delta W_{HSi}$ 值，按坡面各单项措施的减洪比例求出相应的减沙量。即：

$$\Delta W_{HS梯} = \frac{\Delta W_{H梯}\sum_{i=1}^{4}\Delta W_{HSi}}{\sum_{i=1}^{4}\Delta W_{Hi}}$$

$$\Delta W_{HS林} = \frac{\Delta W_{H林}\sum_{i=1}^{4}\Delta W_{HSi}}{\sum_{i=1}^{4}\Delta W_{Hi}}$$

$$\Delta W_{HS草} = \frac{\Delta W_{H草}\sum_{i=1}^{4}\Delta W_{HSi}}{\sum_{i=1}^{4}\Delta W_{Hi}}$$

供求定价模型

姜文来：水资源价值模型研究。资源科学，1998，20(1)

$$Q_2 = Q_1\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^E$$

式中，Q_2 为调整价格后的用水量；Q_1 为调整价格前的用水量；P_1 为原水价；P_2 为调整后的水资源价格；E 为水资源价格弹性系数。

空间自相关与分形方法

张朝生，章申，何建邦：长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究。地理学报，1998，53(1)

(1) Moran 的空间自相关指标：

$$I = \frac{1}{\sum\sum W_{ij}}\cdot\frac{\sum\sum W_{ij}(X_i-\overline{X})(X_j-\overline{X})}{\sum(X_i-\overline{X})^2}$$

式中，X_i 为变量在单元 i 处的值；$\overline{X}$ 为变量 X 的平均值；双求和号表示对全区域的单元求和；W_{ij} 为空间权重函数，表达单元对间的位置关系。

(2) 地统计学变异函数：

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}[Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2$$

式中，$\gamma(h)$ 表示变异函数；$Z(x_i)$ 表示在位置 x_i 处元素含量；$Z(x_i+h)$ 表示与 x_i 距离为 h 处的元素含量；n 为所有距离为 h 的点对数。

(3) 分形结构变异函数：

$$\gamma(h) = \left(\frac{h}{\lambda}\right)^{2H}$$

式中，λ 为常数；$H=3-D$ 为 Hurst 指数，D 为分维数。

人为水土流失各因素危害排序

李智广，郭索彦：人为水土流失因素及其防治措施研究。水土保持通报，1998，18(2)

名次总和指数 R 模型：

$$R = \frac{mn - \sum_{j=1}^{m} d_{ij}}{mn - n}$$

式中，m 为被统计项目个数；n 为用以对比的因素个数；d_{ij} 为 i 因素的 j 项目百分比的名次。

流域水沙统计模型

尹国康：黄河中游多沙粗沙区水沙变化原因分析。地理学报，1998，53(2)

(1) 年产流量统计模型：

$$W_a = aP_a^b$$

式中，W_a(10^4m^3) 为年径流量；P_a(mm) 为年降水量；a 和 b 为待定参数。

(2) 年产沙量统计模型：

$$S_a = cP_a^d$$

式中，S_a 为年输沙量；P_a 年降水量；c 和 d 为待定参数

黄河断流变化规律

关凯，谢贤群，刘恩民：黄河断流概况、变化规律及其预测. 地理研究，1998，17(2)

（1）利津站断流天数与花园口站月平均流量的关系式：

$$N = 36.33 - 0.0215Q$$

式中，N 为利津站断流天数；Q 为花园口站月平均流量。

（2）全日断流天数与总断流天数的关系式：

$$N_d = -2.5579 + 0.9328N$$

式中，N_d 为利津站全日断流天数；N 为总断流天数。

（3）年最长断流天数与时段数的关系式：

$$N_m = 8.9299\exp(0.4526t)$$

式中，N_m 为年最长断流天数；t 为时段数。

（4）累计断流天数与时段数的关系式：

$$\sum N(t) = -95.2254 + 64.0595t - 6.3535t^2 + 0.2017t^3$$

式中，$\sum N(t)$ 为累计断流天数。

（5）年断流长度与时段数的关系式：

$$L = 45.4286 + 95.1429t$$

式中，L 为年断流长度。

（6）最早断流日与时段数：

$$D_{OY} = 209.12\exp(-0.2638t)$$

式中，D_{OY} 为最早断流日。

坡面径流冲刷及泥沙输移的计算

张科利，秋吉康弘，张兴齐：坡面径流冲刷及泥沙输移特征的试验研究. 地理研究，1998，17(2)

（1）发生细沟侵蚀的临界条件：

1）侵蚀沟深与流量及坡度的方程式：

$$H = 0.624Q^{0.81}S_0^{1.11}$$

式中，H 为侵蚀沟的深度；Q 为径流量；S_0 为坡面原始坡度。

2）临界流量与坡度的关系式：

$$Q_c = 1.36S_0^{-1.37}$$

式中，Q_c 为临界流量。

3）坡面上细沟侵蚀发生的临界流量表达式：

$$q_c = c(\sin\theta)^{-7/6}$$

式中，q_c 为坡面上细沟侵蚀发生的临界流量；$c = \frac{1}{n}\left(\frac{\tau_c}{g}\right)^{5/3}$ 为常数，n 为满宁粗糙系数，τ_c 为细沟发生的临界切应力，g 为重力加速度；θ 为坡面倾斜度。

（2）细沟径流的侵蚀产沙特征：

细沟侵蚀率与径流量和坡度的关系式：

$$E = aQ^bS_0^c$$

式中，E 为侵蚀强度；Q 为径流量；S_0 为地面坡度；a，b，c 为系数。

水土流失治理与水土保持效益模型

张茂泉，张雄tion：五华县水土流失治理与水土保持效益. 水土保持通报，1998，18(2)

1. 面状、沟状流失区的治理

（1）水平沟单位蓄水量模型：

$$W = d_1h_1\Phi L$$

$$L = \frac{V_1^2}{\lambda^2 c\Phi I}\cos\alpha$$

式中，W 为单位长度来水量；L 为蓄水沟的最大水平间距；d_1 为土壤透水缩减系数；h_1 为设计频率 24h 最大降雨量；Φ 为径流系数；V_1 为临界冲刷流速；λ 为流速系数；c 为谢才系数；I 为降雨强度；α 为地面角度。

（2）水平梯田面宽模型：

$$B = R(\cot\alpha - \cot\beta)$$

$$B_L = \frac{H}{\sin\alpha}$$

式中，B 为田面宽；H 为田坎宽；B_L 为开挖山坡面斜宽；α 为地面坡角；β 为田坎侧坡坡角。

2. 崩岗流失的治理

（1）上谷坊坝身体积 V 模型：

$$V=AL$$
$$A=\frac{H}{2}(2b-MH)$$
$$L=\frac{坝底长+坝面长}{2}$$

式中，A 为上谷坊坝身断面积；L 为坝身平均长度；H 为坝身平均高度；b 上谷坊坝顶宽度；M 为坝身上下游坡率总和。

(2) 进沙量模型：

$$V_{进}=KFRT$$

式中，$V_{进}$ 为设计使用年限内总进沙量；K 为换算系数；F 为拦沙坝总集雨面积；R 为侵蚀模数；T 为使用年限

天然降水和径流降水中四种微量元素的测定模型

毕桂英：天然降水和径流降水中四种微量元素的测定．水土保持通报，1998，18(2)

(1) 能量差 ΔE 模型：

$$\Delta E=\frac{hc}{\lambda}$$

式中，h 为普朗克常数；λ 为波长；c 为光速。

(2) 吸光度 A 模型：

$$A=KCL$$
$$K=k\beta$$

式中，K 为与原子吸收光谱的波长 λ 和原子的特性有关的常数；β 为与实验条件和被测元素化合物性质有关的系数；C 为试样中被测元素的含量；L 为光程长度．

削减洪峰流量效益模型

钟高纯，李志华，雷廷峰：鲁山县水土保持综合治理开发途径研究．水土保持通报，1998，18(2)

$$\eta=\frac{Q_m-Q}{Q_m}\times100\%$$

$$Q=Q_m\left(\frac{R_m-\Delta R_m}{R_m}\right)^{4/3}$$

式中，Q_m 为治理前洪峰流量；Q 为治理后洪峰流量；R_m 治理前设计洪水径流深；ΔR_m 治理后设计洪水减少径流深。

水资源风险管理模型

冯平：供水系统干旱期的水资源风险管理．自然资源学报，1998，13(2)

(1) 风险和可靠性：

如果把供水系统干旱状态记为 $F\in(L>R)$，正常状态记为 $S\in(L\leqslant R)$，那么，供水系统的风险为：

$$r=P(L>R)=P\{X_t\in F\}$$

式中，X_t 为供水系统状态变量．相应地，供水系统的可靠性为 $\alpha=P(L\leqslant R)=P\{X_t\in S\}=1-r$。

如果对供水系统的工作状态有长期的记录，可靠性也可以定义为供水系统能够正常供水的时间与整个供水期历时之比，即：

$$\alpha=\frac{1}{NS}\sum_{t=1}^{NS}I_t$$

式中，NS 为供水期的总历时；I_t 为供水系统的状态变量，$I_t=\begin{cases}1 & 不缺水\ (X_t\in S)\\0 & 缺水\ (X_t\in F)\end{cases}$。

(2) 恢复性：

$$\beta=P(X_t\in S/X_{t-1}\in F)=\frac{P(X_{t-1}\in F,X_t\in S)}{P\{X_{t-1}\in F\}}\tag{1}$$

引入整数变量 $Y_t=\begin{cases}1 & (X_{t-1}\in F)\\0 & (X_{t-1}\in S)\end{cases}$ 及 $Z_t=\begin{cases}1 & (X_{t-1}\in F,X_t\in S)\\0 & (其他)\end{cases}$，由式(1)可得：

$$\beta=\frac{\sum_{t=1}^{NS}Z_t}{\sum_{t=1}^{NS}Y_t}$$

记 $T_{FS}=\sum_{t=1}^{NS}Z_t$，$T_F=\sum_{t=1}^{NS}Y_t$，则有：

$$\beta=\begin{cases}\dfrac{T_{FS}}{T_F} & (T_F\neq0)\\1 & (T_F=0)\end{cases}$$

(3) 易损性：

为了定量表示系统的易损性，假定系统第 i 次干旱的损失程度为 S_i，其相应的发生概率为 P_i，则系统的易损性可表达为

$$\mu=E[S]=\sum_{i=1}^{NF}P_iS_i\tag{2}$$

式中，NF 为系统干旱的总次数。

在供水系统的风险分析中，可以用缺水量来描述系统干旱的损失程度。类似洪水分析，在此假定不同缺水量的干旱事件是同频率的，则式(2)可写为：

$$\mu=\frac{1}{NF}\sum_{i=1}^{NF}VE_i$$

式中，VE_i 为第 i 次干旱的缺水量。

为了消除需水量的不同影响，一般采用相对值：

$$\mu=\frac{\sum_{i=1}^{NF}VE_i}{\sum_{i=1}^{NF}VD_i}$$

式中，VD_i 为第 i 次干旱的需水量。

饱和水压传导率

baron J S, Hartman M D, Kittel T G F et al：南普拉特流域中土地覆被、水的再分配及温度对生态系统过程的影响。Ecological Applications, 1998, 8(4)

$$K_o=100-5W$$

式中，W 是湿润指数。

实际浸润线方程

郝月清：淤地坝浸润线合理计算方法探讨．水土保持通报，1998，18(4)

$$y=\frac{2H_1}{\pi}\arcsin\frac{x}{L_1}+\frac{2H_2}{\pi}\arcsin\sqrt{\frac{x+m_1H_1}{L_2}}$$

式中，H_1 为上游水深；H_2 为淤泥沙相对排水体的顶端 O_1 点距离高度；L_1 为排水体顶端到 O 点的水平距离；L_2 为排水体顶端到 O_1 点的水平距离。

湿地水文模型

殷康前，倪晋仁：湿地综合分类研究：II.模型，自然资源学报，1998，13(4)

(1) 水文水动力学模型：

连续性方程：$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho V)=0$

动量方程：$\rho\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}=\rho F+\nabla\cdot P$

能量方程：$\rho\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t}=P:S+\nabla\cdot(k\nabla T)+\rho q$

式中，V 为流体流速场矢量；ρ 为流体的密度；P 为流体的应力张量，它是一个有 9 个分量的物理量，用它可以完全描述流场内任一点的应力状况；S 为流体的变形速度张量；$P:S$ 为流体变形消耗的能量；F 为单位流体质点所受到的质量力；U 为单位质量流体的内能，是温度的函数；T 为流体的温度分布场；k 为各方向上的导热率；q 为辐射传热率。

地球环境水体运动的描述在许多情况下是通过求解 Navier-Stocks(简记为 N-S)方程来实现。对地面流动的精确描述方法的方程可表示为：

$$\frac{\partial v}{\partial t}=(v\cdot\nabla)v=F-\frac{1}{\rho}\nabla P+\frac{\mu}{\rho}\nabla^2v$$

式中，v 为空间速度矢量；μ 为流体动力黏滞系数，其他变量定义同前。

对地下水流动的描述，采用多孔介质中水流运动的达西公式：

$$v=-K\nabla\varphi$$

式中，φ 为水头的势函数，K 为达西函数，v 为渗透速度。

如果介质是吸水性的物质，则介质的含水量和渗透速度有关，相应方程为：

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}-\nabla\cdot(K\nabla\varphi)=0$$

式中，θ 为渗透水量。

(2) 泥沙冲淤模型：

对于河流以悬移为主的输运过程，泥沙运动及其床面冲淤变化的基本方程为：

泥沙连续方程：

$$\frac{\partial(AS)}{\partial t}+\frac{\partial(QS)}{\partial x}+\alpha\omega\beta(S-S_0)=0$$

水流挟沙力方程：

$$S_*=K\left(\frac{U^3}{gh\omega}\right)^m$$

河床变形方程：

$$\frac{\partial z_0}{\partial t}=\frac{\alpha\omega}{\rho_s}(S-S_*)$$

对于浅水平面流中的泥沙运动可以采取下列方程描述：

$$\frac{\partial(HS)}{\partial t}+\frac{\partial(UHS)}{\partial x}+\frac{\partial(VHS)}{\partial y}+F_s=\frac{\partial}{\partial x}\left(D_xH\frac{\partial S}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(D_yH\frac{\partial S}{\partial y}\right)$$

以上各式中，S 为含沙量；S_* 为泥沙冲淤平衡时对应的含沙量；ω 为泥沙沉降速度；h 和 H 分别为河流和浅水流动水深；z_0 为河床高程；D_x 和 D_y 为沿纵向（x 向）和横向（y 向）的扩散系数。

(3) 潮流湿地水动力学模型：

$$\frac{\partial \xi}{\partial t}+\frac{\partial (Hu)}{\partial x}+\frac{\partial (Hv)}{\partial y}=0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}-fv+g\frac{\partial h}{\partial x}+R'u-\frac{\theta\rho_a W^2\sin\varphi}{\rho H}-k\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)=0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}-fu+g\frac{\partial h}{\partial y}+R'v-\frac{\theta\rho_a W^2\cos\varphi}{\rho H}-k\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)=0$$

式中，ξ 为潮位，h 为水底距离坐标平面的距离，即平均水深；$H(=h+\xi)$，为实际水深；u 和 v 分别为沿 x 和 y 方向上深度平均流速，其定义可表达为 $(u,v)=\frac{1}{h+\xi}\int[u(z),v(z)]\,\mathrm{d}z$；$f$ 为科氏力系数，$f=2\Phi R\cos\Phi\sin\Phi/86400$，$\Phi$ 为所在点的纬度；R 为地球的半径；g 为重力加速度；R' 为底面切应力系数；W 为风速；θ 为风应力系数；φ 为风速方向和 y 轴正方向的夹角；ρ 为水的密度；ρ_a 为空气密度；k 为垂向的紊动交换系数。

由于切应力梯度造成的作用力包括底摩擦应力、自由表面应力和紊动应力，底摩擦应力（$R'u$ 或 $R'v$）可通过底摩擦应力系数 R' 来确定，如常用的底摩擦二次方率公式：

$$R'=g\frac{(u^2+v^2)^{\frac{1}{2}}}{C^2H}$$

式中，C 为谢才系数。

(4) 潮流湿地水质模型：

$$\frac{\partial P}{\partial t}+u\frac{\partial P}{\partial x}+v\frac{\partial P}{\partial y}=\frac{1}{H}\frac{\partial}{\partial x}\left(HD_x\frac{\partial P}{\partial x}\right)+\frac{1}{H}\frac{\partial}{\partial y}\left(HD_y\frac{\partial P}{\partial y}\right)+S-KP$$

式中，P 为污染物沿垂向平均浓度；u，v 分别为水体垂向平均后沿 x，y 方向的流速；H 为水深；D_x 和 D_y 分别为 x 和 y 方向的分散系数；K 为污染物的降解率；S 为污染强度。

一般地，计算的初始条件可以根据现状监测资料给出：

$$P(x,y)|_{t=0}=P_0(x,y)$$

闭边界条件为：

$$\partial P/\partial n=0$$

式中，n 为闭边界外法线方向。

在开边界处，第一边值的实测资料很难获得。因此，可以认为在海湾涨潮入流阶段，流入的是纯净海水（或污染浓度不变的海水）；落潮出流阶段，假定只有平流输运，边界无污染源，即开边界条件为：

$$\begin{cases}P=P_0\\ \frac{\partial P}{\partial t}+V_n\frac{\partial P}{\partial n}=0\end{cases}$$

分散系数 D_x 和 D_y 通常可以采用经验公式确定（如 Elder 公式等）。

(5) 潮流湿地的泥沙模型：

对于不考虑异重流的简单情形，在波浪和潮流共同作用下的泥沙冲淤基本方程包括：

泥沙连续方程：

$$\frac{\partial S}{\partial t}+\left[u-\frac{\varepsilon_x}{h+\xi}\frac{\partial (h+\xi)}{\partial x}\right]\frac{\partial S}{\partial x}+\left[v-\frac{\varepsilon_y}{h+\xi}\frac{\partial (h-\xi)}{\partial y}\right]\frac{\partial S}{\partial y}+\frac{F_s}{h-\xi}=\varepsilon\Delta S$$

海底变形方程：

$$\frac{\partial \xi_b}{\partial t}+\frac{F_s}{\gamma_c}=0$$

式中，F_s 为海底泥沙冲淤函数，其可表达式为 $F_s=\omega_s-\varepsilon_z\frac{\partial S}{\partial z}$；$\varepsilon$ 为悬沙在水流中的扩散系数；ω_s 为泥沙的沉降速度；ε_x、ε_y 和 ε_z 分别为泥沙在 x，y 和 z 方向上的紊动扩散系数；ΔS 为泥沙的源汇项；ξ_b 为海底床面坐标；γ_c 为泥沙干容重。

结合水动力学方程，给定适当的边界条件，即可求解未知量 ξ_b，F_s 和 S。

侵蚀产沙量模型

郑粉莉：坡面降雨侵蚀和径流侵蚀研究，水土保持通报，1998，18(6)

$$A=\frac{S_{ud}-(S_d+S_u)}{W_u}$$

式中，A为供水上槽单位来水引起试验上槽增加的产沙量；S_c为试验土槽不接受上方来水时的侵蚀产沙量；S_u为供水土槽的侵蚀产沙量；S_{ud}为试验土槽接受上方来水时的产沙量；W_u为上方来水量。

浅层地下水资源合理开发模型

吴剑锋、朱学愚、陈余道等：山东高青平原区浅层地下水资源合理开发利用　地理学报，1998，53(增刊)

$$\begin{cases}\dfrac{\partial}{\partial x}\left(K(H-B_t)\dfrac{\partial H}{\partial x}\right)+\dfrac{\partial}{\partial y}\left(K(H-B_t)\dfrac{\partial H}{\partial y}\right)+\alpha P+ \\ \qquad \beta I-CE_0-Q_a=\mu\dfrac{\partial H}{\partial t} & (x,y)\in D \\ H(x,y,0)=H_0(x,y) & (x,y)\in D \\ H(x,y,t)=H_1(x,y,t) & (x,y)\in \Gamma_1 \\ K\dfrac{\partial H}{\partial n}=q(x,y,t) & (x,y)\in \Gamma_{21} \\ \dfrac{\partial H}{\partial x}=0 & (x,y)\in \Gamma_{22}\end{cases}$$

式中，K为含水层的渗透系数$(m\cdot d^{-1})$；H为地下水水位(m)；B_t为含水层的底板标高(m)；α为降水入渗补给系数；P为降水量；β为灌溉回灌系数；I为灌溉水量；C为潜水蒸发系数；E_0为蒸发量；Q_a为潜水开采强度；μ为含水层的给水度；H_0为初始水头；H_1为第一类边界上的已知水头；q为第二类边界上单位长度法向流量；n为边界的外法线方向；D为计算区域；Γ_1为第一类边界；Γ_{21}为已知流量边界；Γ_{22}为零通量边界。

苏州河水质模型

马蔼乃，张超：基于GIS的水质数值模拟——以上海市苏州河为例　地理学报，1998，53(增刊)

(1) 水动力模型：

$$\frac{\partial A}{\partial t}=-\frac{\partial Q}{\partial x}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}=-u\frac{\partial u}{\partial x}+a_g+a_f+a_w$$

式中，A为过水断面面积；Q为流量；u为断面时均流速；a_g，a_f和a_w分别是纵向重力加速度、阻力作用项和风引起的纵向作用项。

(2) 水质模型：

$$\frac{\partial C_5}{\partial t}+u\frac{\partial C_5}{\partial x}=E_x\frac{\partial^2 C_5}{\partial x^2}-k_dC_5-\frac{V_{s3}}{D}(1-f_{D5})C_5$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial t}+u\frac{\partial C_1}{\partial x}=E_x\frac{\partial^2 C_1}{\partial x^2}-k_nC_1-\frac{V_{s3}}{D}(1-f_{D1})C_1$$

$$\frac{\partial C_6}{\partial t}+u\frac{\partial C_6}{\partial x}=E_x\frac{\partial^2 C_6}{\partial x^2}-k_2(C_s-C_6)-k_dC_5-k_nC_1-\frac{S_{OD}}{D}$$

式中，C_5，C_1和C_6分别是CBOD，NH_3-N和DO的浓度$(mg\cdot L^{-1})$；C_s为饱和溶解氧浓度$(mg\cdot L^{-1})$；k_2为大气复氧系数；k_d，k_n分别是含碳有机物和含氮有机物的氧化速率(d^{-1})；V_{s3}为水体中有机物的沉降速率$(m\cdot d^{-1})$；S_{OD}为底泥沉积物耗氧$(g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1})$；$f_{D5}$，$f_{D1}$分别是溶解态含碳有机物占总的含碳有机物和溶解态含氮有机物占总的含氮有机物的比例；E_x为综合扩散系数$(m^2\cdot s^{-1})$；D为水深(m)；u为河流纵向流速$(m\cdot s^{-1})$。

水循环模型

林耀明：赣江流域的水循环模型　资源科学，1998，20(增刊)

(1) 蒸发子模型：

$$PE_m=16N_m\left(\frac{10T_m}{I}\right)^a \qquad (m=1,2,\cdots,12)$$

$$I=\sum i_m=\sum\left(\frac{T_m}{5}\right)^{1.5}$$

$$a=6.7\times10^{-7}I^3-7.7\times10^{-5}I^2+1.8\times10^{-2}I+0.49$$

式中，m为年内月序号；N_m为各月与日照有关的调整因子；T_m为月平均温度；I为年热量指标。

(2) 土壤水分子模型：

$$ST_i=\begin{cases}f_i(P-PE,SMC,L) & (P-PE_i<0,ST_i<SMC) \\ ST_{i-1}+P-PE_i & (P-PE_i>0,ST_i<SMC) \\ ST_{i-1}+P_i & (P_i>0,T_i<0)\end{cases}$$

式中，$f_i(P-PE,SMC,L)$表示当降水量小于蒸发量$(P-PE_i<0)$并且土壤含水量小于土壤持水量$(ST_i<SMC)$时，土壤含水量ST_i是降水量与蒸发潜力

之差（$P-PE$）、土壤持水能力 SMC 和土壤特征曲线 L 的函数；$ST_{i-1}+P-PE_i$ 表示当降水量大于蒸发量（$P-PE_i>0$）并且土壤含水量小于土壤持水量（$ST_i<SMC$）时，土壤含水量 ST_i 等于前期土壤含水量 ST_{i-1} 加上降水量与蒸发潜力之差（$P-PE$）；$ST_{i-1}+P_i$ 表示当降水量大于 0 而温度小于 0（$P_i>0$和$T_i<0$）时，土壤含水量 ST_i 等于前期土壤含水量 ST_{i-1} 加上降水量（P_i）。

降雨入渗和坡地产流模型

刘贤赵，康绍忠：降雨入渗和产流问题研究的若干进展及评述．水土保持通报，1999，19(2)

(1) 入渗计算与分析：

1) 非饱和土壤水分运动模型：

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left(D(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial z}\right)\ \frac{\partial k(\theta)}{\partial z}$$

式中，θ 为土壤含水量；t 为时间；z 为垂向坐标；k 为水饱和导水率；D 为扩散率。

2) 累积入渗量 $I(t)$ 模型：

$$I(t)=st^{1/2}+At$$
$$i(t)-\frac{1}{2}st^{-1/2}+A$$

式中，$i(t)$ 为入渗速率；s 为吸渗率；A 为稳定入渗率；t 为时间。

(2) 坡地产流：

1) 二维坡地水量转化数学模型：

$$\begin{cases}c(\varphi_m)(\partial\varphi_m/\partial t)=\\ \quad\frac{\partial}{\partial x}[k(\varphi_m)(\partial\varphi_m/\partial x)]+\frac{\partial}{\partial z}[k(\varphi_m)(\partial\varphi_m/\partial z)]-\\ \quad[\partial k(\varphi_m)/\partial x]\sin\alpha+[\partial k(\varphi_m)/\partial z]\cos\alpha\\ \frac{\partial h}{\partial t}+v\frac{\partial h}{\partial x}+h\frac{\partial v}{\partial x}=bR_a(t)-f(x,t)\\ v=\frac{1}{n}\sqrt{\sin\alpha}h^{2/3}\end{cases}$$

式中，$c(\varphi_m)$ 为比水容；φ_m 为基质势；k 为非饱和导水率；x 为水平距离；z 为垂向距离；α 为坡面坡度；t 为时间；h 为坡面水深；v 为坡面流速；n 为有效糙率；f 为入渗率；$R_a(t)$ 为坡面承雨强度；b 为植被截留衰减系数。

2) 坡面产流模型：

连续方程：

$$\frac{\partial(vh)}{\partial x(x,t)}+\frac{\partial h}{\partial t(x,t)}=r(t)-i(t)$$

运动方程：

$$h(x,t)\frac{\partial v}{\partial t}(x,t)+h(x,t)v(x,t)\frac{\partial v}{\partial t}(x,t)=$$
$$g\sin\alpha h(x,t)-g\cos\alpha h(x,t)\frac{\partial h}{\partial x}(x,t)-$$
$$g\cos\alpha h^*(t)\frac{\partial h}{\partial x}(x,t)-\frac{\tau(h,v)}{\rho}+r(t)v^*\sin\alpha$$

式中，h 为坡面水深；v 为坡面流速；α 为坡面坡度；r 为降雨强度；i 为入渗率；t 为时间；g 为重力加速度；τ 为切应力；h^* 为雨滴降落到土壤表面产生的压力增量确定的高度；ρ 为水的密度；v^* 为雨滴降落速度。

超渗产流计算模型

包为民：流域泥沙模型中雨量资料的时空尺度分析．水土保持通报，1999，19(2)

(1) 格林-安普特下渗曲线模型：

$$F_M=F_C\left\{1-K_F\left[\frac{K_U(W_{UM}-W_U)}{W_{UM}}+\frac{(1-K_U)(W_{LM}-W_L)}{W_{LM}}\right]\right\}$$

$$F=\left[1-(1-\alpha_F)^{1/B_F}\right]F_M(1+B_F)$$

式中，F_M 为流域平均下渗能力；F_C 为稳定下渗率；K_F 为渗透系数；W_{LM} 为下层土壤含水容量；W_{UM} 为上层土壤含水容量；W_U 为上层土壤含水容量；K_U 为上层土壤含水量对下渗影响的权重系数；W_L 为下层土壤含水量；F 为流域上某点的下渗能力；B_F 为下渗分布曲线指数；α_F 为下渗能力小于某一定值的面积比例系数。

(2) 地面径流 R_S 的产流计算模型：

$$R_S=\begin{cases}P_E-F_M+F_M\left(1-\frac{P_E/F_M}{1+B_F}\right)^{1+B_F} & (P_E<F_M(1+B_F))\\ P_E-F_M & (P_E>F_M(1+B_F))\end{cases}$$

式中，P_E 为时段净雨量。

流域枯水资源量的估算模型

李秀云，傅肃性，宋现锋等：还总枯水下垫面要素分析与估算应用研究——以澜沧江支流黑江的宗谷河流为例. 资源科学，1999，21(3)

(1) 入渗补给地下水量 R_1 模型：

$$R_1 = P_h\rho$$

式中，P_h 为汛期降水量；ρ 为土壤入渗系数。

(2) 地下水径流 R_g 模型：

$$R_g = M_e F_s$$

式中，M_e 为地下水径流模数；F_s 为单元集水面积。

(3) 水量平衡模型：

$$R = P - E$$

式中，R 为流域多年平均水资源量；P 为流域多年平均降水量；E 为流域多年平均蒸发量。

黄河中游小流域坡沟侵蚀产沙量计算公式

陈浩，王开章：黄河中游小流域坡沟侵蚀关系研究. 地理研究，1999，18(4)

(1) 净产沙增量计算公式：

$$\Delta S_n = S - S_p - S_w$$

式中，ΔS_n 为净产沙增量；S 为坡面水下沟时全坡面和全流域的产沙量；S_p 为坡面下来的泥沙；S_w 为隔绝坡面来水时沟坡产沙量。

(2) 单位水体净产沙增量计算公式：

$$\Delta H_n = H_{so} - H_{si} - H_w$$

式中，ΔH_n 为单位水体净产沙增量；H_w 为隔绝坡面来水时沟坡平均含沙量；H_{si} 为坡面水下沟坡面输入水流平均含沙量；H_{so} 为沟坡输出的水流平均含沙量。

坡流类型及坡地水力侵蚀计算方法

谢承迪：坡流类型及坡地水力侵蚀计算方法. 水土保持通报，1999，19(4)

(1) 坡地流分类及水力侵蚀机制：

宽明渠紊流方程：

$$v_*^2\left(1-\frac{z}{h}\right) = v\left(\frac{d\bar{v}_x}{dz}\right) - \overline{v_x' v_z'}$$

式中，v_x', v_z' 为沿流向、垂向的脉动流速；$\bar{v}_x$ 为沿流向的时均流速；v 为水的运动黏性系数；h 为水深；$v_* = \sqrt{ghJ}$ 为摩阻流速，J 为坡面坡度。

(2) 坡地流动计算方法：

1) 坡地下端出流流量 $Q(t)$ 模型：

$$Q(t) = A\left[\frac{\partial h}{\partial t} + i(t) - fs\right]$$

式中，t 为时间；A 为坡面面积；i 为瞬时雨强；h 为水深；$f = 3h$，为产流后瞬时入渗强度；s 依赖于土质，为雨前含水量的无因次参数。

2) 平均水深 $\bar{h}$ 模型：

$$\bar{h} = 0.336\left(\frac{n}{J}\right)^{0.316}\bar{q}^{0.474}$$

式中，n 为坡面糙度；J 为底坡；$\bar{q}$ 为坡地面平均流量。

(3) 坡地冲刷计算方法：

坡地冲刷模型：

$$\sigma = \eta[F_s, \theta(\mu, r_s)]\lambda(\Delta/h, F_s)\rho(v^2/2)$$

式中，σ 为冲刷强度；η 为冲刷系数；F_s 为坡表颗粒结合紧密度；θ 为单位体积表土中可被冲移走的比例；μ，r_s 分别为土壤的级配度和容重；Δ 为当量糙度；v 为断面平均流速。

影响月径流的主要因素分析方法

丁永建，叶柏生，刘时银：祁连山区流域径流影响因子分析. 地理学报，1999，54(5)

$$RI_{ij} = b_{0j} + b_{1j}RI_{ij-1} + b_{2j}PI_{ij-1} + b_{3j}PI_{ij} + b_{4j}TI_{ij-1} + b_{5j}TI_{ij}$$

式中，RI_{ij} 为均一化的基流；RI_{ij-1} 为均一化的前一月径流；PI_{ij} 为 i 年 j 月均一化的降水；PI_{ij-1} 为均一化的前一月降水；TI_{ij} 为 i 年 j 月均一化的气温；PI_{ij-1} 为均一化的前一月气温；b_{0j}，b_{1j}，b_{2j}，b_{3j}，b_{4j} 和 b_{5j} 为 j 月回归系数。

河流与含水层水力耦合模型

蒋业放，张兴有：河流与含水层水力耦合模型及其应用技术. 地理学报，1999，54(6)

(1) 河水运动数学模型：

$$\frac{\partial Q(l,t)}{\partial t} = \sum_j R_j(t)\,\delta\,(l - l_j) - EW(l,t) - \frac{\partial A}{\partial t}$$

式中，A 为河流过水断面面积；t 为时间；Q 为河流流量；E 为河流与含水层水量交换强度；W 为河水淹没宽度，R 为沿途汇入或引出流量；l 为河流长度坐标；δ 为狄拉克单位脉冲函数。

(2) 河水与地下水水量交换模型：

$$E=\begin{cases}\min[\gamma(H_r-H)\eta, E_m, q_n] & (H<H_r)\\ \gamma(H_r-H) & (H\geq H_r)\end{cases}$$

式中，$q_n=\frac{\partial Q}{\partial l}\cdot\frac{1}{W}$；$E_m$为极限渗漏强度；$E$为泻流强度；$H_r$为河水位；$H$为含水层水位；$\eta$为反映泥沙对渗漏孔隙淤塞情况的经验系数；$\gamma=\frac{k_z}{m}$为河床渗漏系数，$k_z$和$m$别为河床底部弱透水层垂向渗透系数和厚度。

(3) 地下水运动数学模型：

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[k(H-H_d)\frac{\partial H}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[k(H-H_d)\frac{\partial H}{\partial y}\right]+$$

$$\varepsilon+f(x,y)\cdot E-\sum_i\delta(x-x_i)\cdot\delta(y-y_i)=\mu\frac{\partial H}{\partial t}$$

式中，H为含水层水位；H_d为潜水底板标高；k和μ分别为含水层渗透系数和给水度；ε为除河水与地下水交换量之外的其他垂向交换量；Q为生产井开采量；$f(x,y)$为河流识别函数。

月径流模型

黄国标：气候变化对我国东北国际河流的影响研究．地理学报，1999，54(增刊)

(1) 流域内土壤蓄水过程模型：

$$S_{max}\frac{dz}{dt}=[P(t)(1-\beta)]-R_s(z,t)-$$

$$R_{ss}(z,t)-E_v(P_{ET},z,t)-R_b$$

式中，P为考虑融雪因素后的降水；z为相对蓄水；R_b为基流；$R_s=z^s(P_e-R_b)$为地表径流，P_e为有效降水；$R_{ss}=\alpha z^r$为壤中流；P_{ET}为流域蒸发能力；$E_v=P_{ET}\frac{5z-2z^2}{3}$为流域实际蒸发；$S_{max}$为流域蓄水能力；$\beta$为径流系数。

(2) 流域总径流量：

$$R=R_s+R_{ss}+R_b+R_d$$

水资源损失估算模型

王西琴，周孝德：流域水资源财富损失分析计算．水土保持通报，2000，20(1)

$$dv=\frac{\partial f(x_1,x_2)}{\partial x_1}dx_1+\frac{\partial f(x_1,x_2)}{\partial x_2}dx_2$$

式中，v为水资源财富价值；x_2为水质；x_1为除x_2以外影响水资源价值的因素，为一复合函数。

集流量模型

徐学选，穆兴民，王文龙：黄土高原(陕西部分)雨水资源化潜力初步分析．资源科学，2000，22(1)

$$Q_1=n_1n_2n_3S_1R_y$$

$$Q_2=n_1n_4S_1R_{rs}$$

式中，Q_1为年集流量；Q_2为雨季集流量；n_1为集流面积系数；n_2为产流雨率；n_3为年集流系数；n_4为雨季产流系数；S_1为集流面积；R_y为年降雨量；R_{rs}为雨季雨量。

太湖流域水文模拟

王腊春，谢顺平，周寅康等：太湖流域洪涝灾害淹没范围模拟．地理学报，2000，55(1)

(1) 面产流模式：

$$R_{水}=P-\beta E$$

式中，P为时段降雨量(mm)；E为时段蒸发量(mm)；β为蒸发折算系数；$R_{水}$为时段水面产流量(mm)。

(2) 水田产流模式：

$$H_2=P-\alpha E_{日}/24+H_1$$

当$H_2>H_p$时：

$$R_{田}=H_2-H_p$$

当$H_m<H_2\leq H_p$时：

$$R_{田}=H_2-H_m$$

$$H_2=H_m$$

当$H_r<H_2\leq H_m$时：

$$R_{田}=0$$

$$H_2=H_2$$

当$(H_R+H_m)/2<H_2<H_m$时：

$$R_{田}=H_2-(H_r+H_m)/2$$

$$H_2=(H_r+H_m)/2$$

当$H_2\leq(H_r+H_m)/2$时：

$$R_{田}=0$$

$$H_2 = H_2$$

式中，α 为水稻田需水系数；H_1 为时段初稻田水深(mm)；H_2 为时段末稻田水深(mm)；H_p 为稻田耐淹水深(mm)；H_m 为稻田适宜水深上限(mm)；H_r 为稻田适宜水深下限(mm)；$R_田$ 为稻田产流量(mm)。

(3) 旱地产流模式：

$$R_旱 = P-(W_m - W_0)-E$$

式中，$R_旱$ 为时段产流量(mm)；W_m 为流域平均最大蓄水量(mm)；W_0 为初始流域平均蓄水量(mm)。

(4) 总产流量计算模型：

$$R_总 = f_水 R_水 + f_田 R_田 + f_旱 R_旱$$

式中，$f_水$、$f_田$、$f_旱$，$R_水$、$R_田$ 和 $R_旱$ 分别为水面、水田、旱地的所占比重和产流深。

(5) 平原水网汇流模型：

水流在河网中的运动可采用明渠一维非定流来进行模拟。其基本方程为：

$$\frac{\partial Q}{\partial X} + B_T \frac{\partial Z}{\partial t} = q_L$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2u\frac{\partial Q}{\partial X} + (gA - Bu^2)\frac{\partial z}{\partial X} - u^2 \frac{\partial A}{\partial X}\Big|_Z + g\frac{n^2|u|}{R^{4/3}} = 0$$

式中，X、t 表示坐标的距离和时间，为自变量；Q、z 表示断面的流量、水位，为待求量；A、u、R 分别为过水面积、流速和水力半径；B 为河道泄流断面宽；B_T 为包括泄流断面宽度和仅起调蓄作用的附加宽度；$\left.\frac{\partial A}{\partial X}\right|_Z$ 表示同一水位时，过水断面面积随距离的变化率；q_L 为单位河长均匀旁侧入流；n 为糙率，根据河道情况，各河道不同，本文取 n=0.022~0.027。

溢洪道陡段侧墙高度优化设计计算公式

阮成江，康文平：溢洪道陡段侧墙高度优化设计．水土保持通报，2000，20(2)

(1) 断面单位能模型：

$$E_s = h_s \cos\theta + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2}$$

式中，E_s 为断面比能；θ 为坡度；α 为修正系数；Q 为流量；A 为断面面积；g 为重力加速度；h_s 为断面水深。

(2) 比能沿程变化微分方程：

$$\frac{dE_s}{dl} = i - J$$

式中，dE_s 为比能沿程变化；dl 为流程长度；i 为底坡；J 为水力半径。

(3) 临界水深模型：

$$\frac{A_k^3}{B_k} = \frac{Q^2}{g}$$

$$A_k = (b + mh_k)h_k$$

$$B_k = b + 2mh_k$$

式中，A_k 为临界流断面的过水段面积；B_k 为临界流断面的水面宽度；b 为渠底宽；m 为边坡系数；h_k 为临界水深。

(4) 正常水深 h_0 模型：

$$h_0 = \left(\frac{hQ}{\sqrt{i}}\right)^{0.6} \frac{\left(b - 2h_0\sqrt{1+m^2}\right)^{0.4}}{b + mh_0}$$

Liapunov 指数谱

周寅康，王腊春，许有鹏等：淮河流域洪涝变化的耗散性．地理研究，2000，19(3)

(1) Liapunov 指数：

$$\lambda = \lim_{t\to\infty} \frac{1}{t} \ln|\delta x(t)|$$

式中，λ 为 Liapunov 指数；t 为时间；$\delta x(t)$ 为初始轨线 $x_0(t)$ 附近的一个小扰动。

(2) 空间体积的变化率计算公式：

$$\mathrm{div}\, v = \frac{\partial \dot{x}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{y}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{z}}{\partial x} < 0$$

式中，$\mathrm{div}\,v$ 为空间体积的变化率；x，y，z 为三维相空间的状态变量；$\dot{x}$，$\dot{y}$ 和 $\dot{z}$ 为这三个状态变量的“速度”。

(3) Liapunov 指数谱：

$$\lambda_i = \frac{1}{p\Delta tk}\sum_{j+1}^{k} \ln R_{(j)kk}$$

式中，λ_i 为 Liapunov 指数谱；k 为矩阵 $R_{(j)}$ 的个数，$k \leqslant (N - mp - 1)/p$；$\Delta t$ 为时间间隔；$R_{(j)kk}$ 为矩阵 $R_{(j)}$ 的主对角线元素值。

水资源利用的边际效益分析原理与计算方法

王智勇，王劲峰，于静洁等：河北省平原地区水资源利用的边际效益分析．地理学报，2000,55(3)

(1) 水的边际效益模型：

$$MR=\frac{\Delta Y}{\Delta X}=\frac{Y_1-Y_0}{X_1-X_0}$$

式中，MR 表示边际收益(边际效益)；ΔY 表示产值的变化量；ΔX 表示投入要素的变化量。

(2) 工业用水边际效益(MR_{ind})模型：

$$MR_{ind}=\left|\frac{Y_{i-t}\Big/\prod_{k=1}^{t}g_{i+k}\omega_t-Y_i}{X_{i+t}-X_i}\right|$$

式中，Y_i 表示第 i 年的工业总产值；Y_{i-t} 表示第 $i+t$ 年的工业总产值；g_{i+k} 表示第 $i+k$ ($k=1,2,\cdots,t$)年的固定资产增加指数；X_i 表示第 i 年的工业用水，X_{i+t} 表示第 $i+t$ 年的工业用水；ω_t 为工业产出弹性因子，用来反映在生产条件还原过程中资本劳动变化后产出的变化程度。

(3) 农业用水边际效益(MR_{agr})模型：

$$MR_{agr}=\left|\frac{Y'_{i+t}\Big/\prod_{k=1}^{t}r_{i+k}\omega'_t-Y'_i}{X'_{i+t}-X'_i}\right|$$

式中，Y'_i 为第 i 年的农业总产值；Y'_{i+t} 为第 $i+t$ 年的农业总产值；r_{i+k} 为第 $i+k$($k=1,2,\cdots,t$)年的农业机械总动力增加指数；X'_i 为第 i 年农业用水量；X'_{i+t} 为第 $i+t$ 年的农业用水量；ω'_t 为产出弹性因子，用来表示产出的资本弹性、劳动弹性以及自然灾害对于农业生产的影响。

(4) 工农业综合物价指数(P_{agg})模型：

$$P_{agg}=r_{ind}\cdot P_{ind}-(1-r_{ind})P_{agr}$$

式中，r_{ind} 为工业在工农业总产值中的比重；P_{ind} 为农村工业品零售价格总指数；P_{agr} 为农副产品收购价格总指数。

年均输沙率模型

许炯心，张欧阳：黄河下游游荡段河床调整对于水沙组合的复杂响应．地理学报，2000，55(3)

$$Q_s=aQ^b$$

式中，b 通常为 2.0 左右；$a=Q_s/Q^2$ 为来沙系数，表示单位流量下的输沙率；Q 为年平均流量。

径流演变的趋势性计算公式

李丽娟，郑红星：华北典型河流年径流演变规律及其驱动力分析——以潮白河为例．地理学报，2000，55(3)

肯德尔统计量 τ、方差 σ_τ^2 和标准变化量 M 的计算公式：

$$\tau=\frac{4P}{N(N-1)}-1$$

$$\sigma_\tau^2=\frac{2(2N+9)}{9N(N-1)}$$

$$M=\tau/\sigma_\tau$$

式中，P 为径流系列所有对偶观测值($R_i,R_j,i<j$)中 $R_i<R_j$ 中出现的次数；N 为系列长度。

泥沙输移比的时空变化模型

陈浩：黄土丘陵沟壑区流域系统侵蚀与产沙关系．地理学报，2000，55(3)

(1) 多年平均泥沙输移比的预报模型：

$$D_r=0.657A^{-0.014}G_m^{0.962}H^{0.152}$$

$$r=0.999$$

式中，A 为流域面积(km^2)，G_m 为沟道密度($km\cdot km^{-2}$)；H 为多年平均径流深(mm)。

(2) 次降雨径流对泥沙输移比综合影响的预报模型：

$$D_r=0.403P_b^{0.37}H_b^{1.066}H_f^{0.191}$$

$$r=0.996\qquad n=125$$

式中，P_b 为雨量分布比；H_f 为洪峰增幅比；H_b 为径流深度比。

(3) 在次降雨条件下，各级沟道含沙水流的挟沙能力变化模型：

$$H_n=H_{so}-H_{si}$$

式中，H_n 为单位水体产沙增量($kg\cdot m^{-3}$)；H_{so} 为各级沟道输出平均含沙量($kg\cdot m^{-3}$)；H_{si} 为单元沟道小流域输出平均含沙量($kg\cdot m^{-3}$)；

(4) 流域面上的水流切应力(τ)模型：

$$\tau=\gamma_m hJ=\rho ghJ=\rho u_*^2$$

式中， $u_*=(ghJ)^{1/2}=(\tau/\rho)^{1/2}$ 为影响流域面上泥沙起动的摩擦流速；γ_m 为水的容重；h 为水深(径流深，mm)；J 为能坡(流域坡降，‰)；ρ 为水的密度；g 为重力加速度。

径流预测模型

刘昌明，成立：黄河干流下游断流的径流序列分析．地理学报，2000，55(3)

(1) 双评分准则公式：

$$C_{SC}2_k=\frac{Q_k}{Q_x}+\frac{\lambda N}{N_k}$$

式中，Q_k 为残差平方和；Q_x 为均值作预测项得的残差平方和；N 为序列个数；N_k 为趋势预测评分；λ 为权重。

(2) 径流预测模型：

$$q(N+t)=\varphi_0+\sum_{i=1}^{k}\varphi_i f_i'(N+t)\qquad(t=1,2)$$

式中，q 为预测径流；f_i' 为均生函数；φ_0和φ_i 为系数。

水资源完全成本定价的理论模型

何锦峰，陈国阶：水资源完全成本定价的理论探讨．自然资源学报，2000，15(3)

水资源的社会机会成本：

$$P=P_1+P_2+P_3+P_4 \tag{1}$$

水资源价值数学表达：

$$P_1=P_{11}+P_{12} \tag{2}$$

水资源本身价值的计算公式：

$$P_1=R/i \tag{3}$$

水资源人类劳动新价值：

$$P_2=(1+\rho)(C+V)=C+V+M \tag{4}$$

考虑利息：

$$P_2=\frac{1}{i}(1+\rho)(C+V)=C+V+M \tag{5}$$

实际价值：

$$P_1+P_2=\frac{1}{i}(R+C+V+m) \tag{6}$$

水资源外部成本：

$$P_3=P_{31}-P_{32}=\sum_{i=1}^{m}K_{i1}H_iM+\sum_{i=1}^{m}K_{i2}H_iM=\sum_{i=1}^{m}K_iH_iM \tag{7}$$

水资源社会机会成本：

$$P_4=\sum_{i=1}^{n}L_iQ_i \tag{8}$$

水资源完全成本定价模型：
将(3)、(5)、(7)、(8)代入式(1)得：

$$P=\frac{1}{i}(R+C+V+m)+A \tag{9}$$

考虑供求关系的水价：

$$P=\frac{1}{i}[(R+C+V+m)+A]\frac{Q_dE_d}{Q_sE_s} \tag{10}$$

动态完全成本价格为：

$$P_t=(1+i')^tP=\frac{(1+i')^t}{i}[R+(C+V+m)+A]\frac{Q_dE_d}{Q_sE_s} \tag{11}$$

以上公式中，$A=\sum_{i=1}^{m}K_iH_iM+\sum_{i=1}^{n}L_iQ_i$；$P$ 为水资源的价格；P_1 表示水资源本身的价值，即未经人类劳动参与的、天然产生的价值；P_2 表示基于人类劳动投入产生的新价值；P_3 表示水资源外部性引起的外部成本；P_4 表示水资源多用途及稀缺性决定的社会机会成本；P_{11} 为水资源实物价值；P_{12} 为水资源环境价值；R 为水资源的地租或租金；i 为平均利息率；C 表示固定资本；V 表示流动资本；m 代表正常利润；ρ 指资本社会平均利润率；P_{31} 代表水污染的经济损失；P_{32} 为废水处理或水环境恢复费用；K_{i1} 为损失系数；K_{i2} 为恢复系数；K_i 为外部成本系数；H_i 为第 i 种污染因素单位量的外部成本；M 为产品产值；L_i 为每个行业的机会成本系数；Q_i 为用水量；Q_d、Q_s分别为水资源需求量及供给量；E_d、E_s 分别为水资源的需求弹性系数和供给弹性系数；i' 为水资源的年贴现率。

水土资源平衡研究的基本原理

林耀明，任鸿遵，于静洁等：华北平原的水资源平衡研究. 自然资源学报，2000，15(3)

农田水资源平衡方程：

$$P_t - Qs_t - K_c \cdot PE_t - \Delta M_t - (Q_{up} - Q_{uc})_t - \eta = 0 \quad (1)$$

式中，P_t 为平衡时段(t)的降水量(mm)，t 对应于作物生长期内的月份序数；Qs_t 为平衡时段(t)的产流量(mm)，通过降水—径流关系求得；K_c 为平衡时段(t)的作物系数，作物需水量由 $K_c \times PE_t$ 得到；PE_t 为平衡时段(t)的蒸发潜力(mm)；$(Q_{up} - Q_{uc})_t$ 为平衡时段(t)的降水入渗量与毛管上升水量之差(mm)；η 为平衡时段(t)的误差项(mm)，包括未考虑到的因素。

考虑到式(1)中的 ΔM_t 可以从相邻两时段的土壤有效含水量(ST)中得到，即：

$$\Delta M_t = ST_t - ST_{t-1} \quad (2)$$

将(2)代入(1)，有：

$$P_t + ST_{t-1} - K_c \cdot PE_t - Qs_t = ST_t + (Q_{up} - Q_{uc})_t + \eta \quad (3)$$

产沙经验公式

舒长先：黄河中游地区泥沙变化研究进展. 水土保持通报，2000，20(3)

(1) 降雨-产沙的关系模型：

$$W_s = 48 P_e^{0.7} I_e^{1.8}$$

式中，W_s 为年沙量；P_e 为有效降雨量；I_e 为有效雨强。

(2) 径流-泥沙的关系模型：

$$W_s = 0.0306 W_n^{1.27}$$

式中，W_s 为年沙量；W_n 为地表年径流量。

水土流失计算与预测模型

李瑞林，王玉太，张保祥等：石灰岩山区工程建设对水土流失的影响研究. 水土保持通报，2000，20(5)

(1) 地表径流量 R_s 与径流系数 α_s 模型：

$$R_s = \alpha_s F P_i$$

$$\alpha_s = A_s \lg P_i - \lg P_B + D_s$$

式中，F 为计算面积；P_i 为降水量；A_s 为地表汇流指数；P_B 为年雨量损失值；D_s 为土壤调节转化重复系数。

(2) 水土流失方程：

$$E = 0.224 R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

式中，E 为土壤侵蚀模数；R 为降雨侵蚀因子；K 为土壤可蚀性因子；LS 为地面坡长坡度因子；C 为植被覆盖因子；P 为水保措施因子。

枯水分析模型

李秀云，傅肃性，李丽娟：河流枯水极值分析与模型预测研究. 资源科学，2000，22(5)

(1) 皮尔逊Ⅲ型分布模型：

$$f(x;x_0,r) = \frac{r^r}{\Gamma(r)x_0}\left(\frac{x}{x_0}\right)^{r-1} e^{-r\frac{x}{x_0}}$$

$$\Gamma(r) = \int_x^{\infty} t^{r-1} e^r \mathrm{d}t$$

均值：$E(x) = x_0$

离差系数：$C_v = \frac{1}{\sqrt{r}}$

偏态系数：$C_s = 2C_v$

(2) 耿贝尔——极值分布模型：

$$P(X > x_i) = 1 - \exp\{-\exp[-a(x-q)]\}$$

$$P(x;a,q) = a\exp\{-a(x-q) - \exp[a(x-q)]\}$$

$$x_0 = q + \frac{0.577}{a}$$

$$\sigma x = \frac{\pi}{\sqrt{6}a}$$

$$C_v = \frac{1.282}{(aq + 0.577)}$$

$$C_s = 1.14$$

潮汐河网水动力与水质数学模型

曾凡棠等：环境决策支持系统的设计及其在水质管理中的应用. 自然资源学报，2000，55(6)

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (uQ)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x}\left(\alpha \frac{\partial Q}{\partial x}\right) + gA\frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{gn^2 Q|Q|}{AR^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial(uC)}{\partial x}-\frac{\partial}{\partial x}\left(E_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+K(C-C_S)=S_{LB} \quad (3)$$

式中，x为沿河道中泓线坐标(m)；u为断面平均流速($m\cdot s^{-1}$)；Q为流量($m\cdot s^{-1}$)；A为过水断面面积(m^2)；t为时间(s)；ξ为水位(m)；g为重力加速度($m\cdot s^{-2}$)；α为水体有效黏滞系数($m^2\cdot s^{-1}$)；n为糙率($s\cdot m^{-1/3}$)；R为水力半径(m)；C为水质组分浓度($mg\cdot L^{-1}$)；K和C_S分别为改水质组分的转化速率常数(s^{-1})及均衡浓度($mg\cdot L^{-1}$)；E_x为混合系数($m^2\cdot s^{-1}$)；S_{LB}为外界输入或由其他水质组分经过生化动力学过程产生的源漏量($g\cdot m^{-3}\cdot s^{-1}$)。方程(1)、(2)和(3)分别描述了水量、动量和污染物质量的守恒定律。

未来气候情景下月降水量的概率模型

张建敏，黄朝迎，吴金栋：气候变化对三峡水库运行风险的影响．自然资源学报，2000，55(supplement)

研究发现，$\Gamma(\alpha,\beta)$分布能比较好地拟合月降水量分布，其概率密度函数$f_k(x)$和分布函数$F_k(x)$分别为：

$$f_k(x)=\frac{\beta_k^{\alpha_k}}{\Gamma(\alpha_k)}x^{\alpha_k-1}e^{\beta_k x} \quad (1)$$

$$F_k(x)=\int_0^x f_k(x)\mathrm{d}x \quad (2)$$

式中，α_k是形状参数；β_k是尺度参数；$k=1,2,\cdots,12$，表示月份。

气候风险指标的计算模型

张建敏，黄朝迎，吴金栋：气候变化对三峡水库运行风险的影响．自然资源学报，2000，55(supplement)

(1) 干旱和洪涝风险指数：

$$I_i=\int_{0.0}^{0.1} f_i(x)\mathrm{d}x \qquad (i=10,11,12,\cdots,3)$$

$$F_j=1.0-\int_{0.0}^{0.9} f_j(x)\mathrm{d}x \qquad (j=4,5,\cdots,9)$$

式中，x为月降水量；$f_i(x)$和$f_j(x)$分别表示枯水期和汛期各月降水量概率密度函数(用伽马分布拟合)；i和j表示月份。

(2) 月降水量的变异系数：

$$cv=\frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})}{n-1}}}{\bar{x}}$$

式中，x_i为月降水量；$\bar{x}$为其均值；n为样本数。

异常雨涝指标的计算模型

姜爱军，周学东，周桂香等：长江下游异常雨涝及其对农业影响的评估．自然资源学报，2000，55(supplement)

(1) 单站异常雨涝指标：

$$I=1/m\sum_{i=4}^{10}\Delta R_i$$

式中，ΔR_i为4~10月间月降水距平百分率≥50%的月降水距平百分率；m为月降水距平百分率≥50%的月数。$I\geq 1.5$时，认为单站出现异常雨涝，形成大雨涝。

(2) 区域异常雨涝指标：

$$d=1/n\sum\alpha_i X_i \qquad (i=1,2,3)$$

式中，d为区域雨涝指标；X_1，X_2，X_3分别为出现一般雨涝、中涝、大涝的站数；α_1，α_2，α_3为相应的权重，分别为$\alpha_1=1$，$\alpha_2=1.5$，$\alpha_3=2$；n为区域内代表站数。

水流数学模型

李永兴，卢永金，莫敖金：长江口外沙内泓河段保滩护岸对策研究．水土保持通报，2001，21(1)

二维不可压缩浅水流动方程：

$$\frac{\partial h}{\partial t}+h\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial h}{\partial x}\right)+u\frac{\partial h}{\partial x}+v\frac{\partial h}{\partial y}=0$$

$$h\frac{\partial u}{\partial t}+hu\frac{\partial u}{\partial x}+hv\frac{\partial u}{\partial y}-\frac{h}{\rho}\left(E_{xx}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+E_{xy}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)+gh\left(\frac{\partial a}{\partial x}+\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{gun^2}{\left(h^{1/\sigma}\right)^2}\cdot\left(u^2+v^2\right)^{1/2}-\xi V_a^2\cos\psi-2hwv\sin\varphi=0$$

$$h\frac{\partial v}{\partial t}+hu\frac{\partial v}{\partial x}+hv\frac{\partial v}{\partial y}-\frac{h}{\rho}\left(E_{yx}\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+E_{yy}\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)+$$

$$gh\left(\frac{\partial a}{\partial x}+\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{gun^2}{\left(h^{1/\sigma}\right)^2}\cdot\left(u^2+v^2\right)^{1/2}-$$

$$\xi V_a^2\cos\psi-2hwv\sin\varphi=0$$

式中，h 为水深；u、v 为 x、y 方向的流速；t 为时间；ρ 为流体密度；E 为水平涡动黏滞系数；g 为重力加速度；a 为河床底高程；n 为 Manning 系数；σ 为经验风剪系数；V_a 为风速；w 为地球自转角速度；ψ 为风向；φ 为地球纬度。

小流域雨水资源化理论潜力计算方法与评价模型

冯浩，邵明安，吴普特：黄土高原小流域雨水资源化潜力计算与评价探讨．自然资源学报，2001，16(2)

(1) 小流域雨水资源化理论潜力计算方法：

$$R_t=PA\times10^3$$

式中，R_t 为小流域雨水资源的理论潜力(m^3)；P 为流域降水量(mm)；A 为小流域的面积(km^2)。

(2) 小流域雨水资源可实现潜力表达式：

$$R_a=\lambda_R PA\times10^3$$

式中，R_a 为雨水资源可实现潜力(m^3)；P 为降水量(mm)；A 为面积(km^2)，λ_R 为降雨调控系数，与技术、经济水平有关，$\lambda_R P$ 是指可以调控的雨水资源量。

(3) 雨水就地利用方式下的可实现潜力计算公式：

$$R_a=\lambda_R PA_1\times10^3$$

(4) 雨水叠加利用方式的可实现潜力计算公式：

$$R_a=\lambda_{R A_2}(\lambda_{R A_1}A_1+A_2)P\times10^3$$

式中，$\lambda_{R A_1}$ 为 A_1 区的降雨调控系数；$\lambda_{R A_2}$ 为 A_2 区的降雨调控系数，可以通过野外降雨径流资料或室内模拟降雨试验确定。

(5) 雨水异地利用方式的可实现潜力计算公式：

$$R_a=\lambda_R PA_2\times10^3$$

(6) 小流域雨水资源利用评价模型：

1) 用 $D_{W\max}$ 表示小流域雨水资源最大可以开发的程度：$D_{W\max}$ 可以表达如下：

$$D_{W\max}=(R_a/R_t)\times100\%$$

式中，R_a 为可实现潜力；R_t 为理论潜力。

2) 用 W_{Dreal} 表示小流域雨水资源实际开发的程度：W_{Dreal} 可以表达如下：

$$W_{Dreal}=(R_r/R_t)\times100\%$$

式中，R_r 为现实潜力；R_t 为理论潜力

3) 用 W_d 表示小流域的实际需水程度，则 W_d 可以表达如下：

$$W_d=(R_d/R_t)\times100\%$$

式中，R_d 为实际需水量；R_t 为理论潜力。

水窖建设工程规划模型

史慧珍，徐学选，张世彪：黄土高原窑窖集水工程技术探讨．水土保持通报，2001，21(2)

年集水量 Q_p 和水窖数 N 模型：

$$Q_p=\sum c_i q_i$$

$$N=\frac{Q_p}{\lambda V}$$

式中，c_i 为第 i 用水项数量；q_i 为第 i 用水项的用水定额；V 为单窖窖容；λ 为窖的重复利用率。

旱地水窖设计参数的确定模型

秦宗科，党进谦，许永功等：黄土地区水窖窖设计参数与施工技术研究．水土保持通报，2001，21(3)

(1) 水窖的合理矢跨比模型：

$$\frac{f}{a_1}=\frac{1}{2f_k}$$

$$f_k=\tan\varphi+\frac{c}{\gamma H}$$

式中，f 为拱矢高；a_1 为水窖上口宽即拱的跨度；f_k 为土体坚固性系数；φ 为土的内摩擦角；γ 为土的容量；c 为土的黏聚力；H 为水窖顶部覆土厚度。

(2) 水窖的容积 V 模型：

$$V=0.5(a_1+a_2)hL$$

式中，a_1 为上口宽；a_2 为下口底宽；h 为蓄水深；L 为窖长。

黄河断流严重程度的识别模型

钱征寒等：黄河断流严重程度分级与判别方法．地理学报，2001，56(6)

$$F_{nsl}=f(K_{smx},K_{lj},C_{vy})$$

式中，F_{nsl}为黄河下游断流严重程度(或级别)；K_{smx}、K_{lj}和C_{vy}分别为三门峡的径流量，利津的径流量及其年内径流变差系数。C_{vy}是用以描述来水特性的另一个常用指标，反映径流量的年内分配状况的径流变差系数，可定义为$C_{vy}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12}\left(\frac{k_i}{\bar{K}}-1\right)^2}{12}}$，$k_i$为$i$个月径流量占年径流量的百分比，$\bar{K}=8.33\%$，为各月平均占全年的百分比。

可供水量概念及计算方法

贾绍凤，张士锋：黄河流域可供给水量究竟有多少．自然资源学报，2001，16(5)

(1) 黄河流域可供水量计算公式：

$$M=r_1Y_1+r_2Y_2+Y_3$$

式中，M是可供水量，Y_1是流域内地表水可利用量(可净消耗量)，r_1是地表水重复利用倍数，Y_2为流域内地下水可利用量(可净消耗量)，r_2是地下水重复利用倍数，Y_3是流域外引水量。

(2) 地表水可利用量计算公式：

$$Y_1=W_s-S-Y_3$$

式中，W_s是地表水资源，S是生态用水量，包括海水量和流域非用水消耗量。

(3) 地下水可利用量计算公式：

$$Y_2=W_g-F_g$$

式中，W_g是地下水水资源量，F_g是浅水蒸发量。

(4) 水资源重复利用倍数r与引水的消耗系数α、回归系数β有下列关系：

$$r=1/\alpha \qquad \alpha=1-\beta$$

第十一章 植 被

用管状日射表测量植物间辐射的模型

Szeicz G, Monteith J L, Santos J M D：用管状日射表测量植物间的辐射．Journal of Applied Ecology, 1965, 1(1)

(1) 农作物树冠下可见光辐射的强度（I_V）：

$$I_V = I - I_R$$

式中，I 是被测总辐射(0.4～2 μm)；I_R 是红外线成分(0.75～2 μm)。

(2) 树冠上面的红外线成分$[I_R(0)]$为：

$$I_R(0) = 0.41I(0)$$

(3) 树冠下的可见光辐射的转换部分为：

$$I_V / I_V(0) = [I / I(0) - 0.41I_R / I_R(0)]/0.59$$

式中，$I(0)$ 是树冠上的总辐射；$I_V(0)$ 是农作物树冠上面可见光辐射的强度。

截雨系数

张克映：从植被冠层表面对大气降雨的再分配作用谈植被阻截雨量的确定方法．植物生态学与地植物学丛刊，1965，3(2)

$$K_{a,v} = 1 - \frac{1-K}{\tan\alpha\tan\gamma\cos\Omega}$$

或

$$K_{a,v} = 1 - \frac{1-K}{1+[v\tan\alpha\cos\Omega\, a(\ln t + b)]}$$

式中，K 为截雨系数；$K_{a,v}$ 为植被冠层坡度为 a 和水平风速为 v 时的截雨系数；γ 为雨滴对垂线的偏角；$\cos\Omega$ 为风向订正系数；a、b 为实验常数；t 为降雨强度。

亚洲东部树线高度与纬度分布的关系模型

牛文元：自然地带性的理论分析．地理学报，1980, 35(4)

$$H = e^{2.3(b\phi+a)}$$

式中，H 代表树线分布高度；ϕ 代表地理纬度；a、b 均为常数(随不同类型的自然界线以及所讨论的地区范围而变)。

红松林和采伐迹地的水量平衡分析模型

朱劲伟，崔启武，史继德等：红松林和采伐迹地的水量平衡分析．生态学报，1982，2(4)

(1) 年平均蒸发散量 E 模型：

$$E = \sqrt{\frac{Rr}{L}\operatorname{th}\frac{rL}{R}\left(1-\operatorname{ch}\frac{R}{rL}+\operatorname{sh}\frac{R}{rL}\right)}$$

式中，R 为年辐射平衡；r 为年降水量；L 为蒸发潜热；th 为双曲线正切函数；ch 为双曲线余弦函数；sh 为双曲线正弦函数。

(2) 森林水量平衡方程：

林冠层：

$$r + Q = (E_1 + E_1') + r_f + r_p$$

林地：

$$r_f + r_p = (E_2 + E_2') + (F_1 + F_2) + f + Q$$

森林：

$$r = (E_1 + E_1') + (E_2 + E_2') + (F_1 + F_2) + f$$

采伐迹地：

$$r = (E_2 + E_2') + (F_1 + F_2) + f$$

式中，r 为大气降水量；r_f 为树干径流量；r_p 为透过林冠降水量(林内降水量)；E_1 为林冠的物理蒸发量；E_1' 为林冠蒸腾量；E_2 为地表的物理蒸发量；E_2' 为地表植物的蒸腾量；F_1、F_2 分别为地表和土壤径流量；f 为深层入渗量(或地下径流量)；Q 为乔灌木根系的吸水量。

(3) 森林对洪水影响的数学模型：

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} = \frac{-0.17(E_a + E_a')W_a}{[W_a + (E_a + E_a')t]^2} < 0$$

式中，W_a 为无林地的持水量；t 为暴雨开始后的时间；$E_a + E_a'$ 为无林地的蒸发散强度。

植物物候期分析公式

龚高法，简慰民：我国植物物候期的地理分布．地理学报，1983，38(1)

$$Y = a + b(\varphi - 30°) + c(\lambda - 100°) + dh$$

式中，Y 为某一地点某种植物的物候期；φ 为纬度；λ 为经度；h 为海拔高度(单位为 100m)；a、b、c 和 d 为

系数

植被干扰指数

Clark T P, Euler D L, McDonnell J A et al：植被干扰指数的实地检验 Ecological Modelling, 1984, 23

干扰是指在三层中被干扰的植被面积的总和，被表示为植被总面积的一部分：

$$\mathrm{ADI} = \frac{A_g + A_s + A_t}{a}$$

式中，A_g 是贴地层中被干扰的面积；A_s 是灌木层中被干扰的面积；A_t 是树木层中被干扰的面积；a 是用来测量干扰的一个任意单位。

Racey 和 Euler (1983)观察到在被干扰的土地数量和被个体所拥有的土地数量之间是一致的。在一些小地块上有较高的 ADI 值：

$$\mathrm{ADI} = 1/\left[4.685\exp(0.4163\mathrm{lotsize}) - 2.0\exp(1.256\mathrm{lotsize})\right]$$

禾草的水分利用、叶片角度和平直度的机理模拟

Coughenous M B：东非禾草的水分利用、叶片角度和平直度的机理模拟分析 Ecological Modelling, 1984, 26

(1) 光合作用模型：

$$P_N = \frac{\rho_{ca} - \Gamma}{r_i + r_s^c + r_b^c}$$

式中，P_N 是净光合作用；ρ_{ca} 是周围环境；Γ 是内部的 CO_2 浓度；r_i、r_s^c 和 r_b^c 分别是内部的、气孔的和叶边界层的阻力。

(2) 最大枝条重量(SWM)：

$$\mathrm{SWM}(t) = \mathrm{SWM}(0)\frac{\sum_N (f_{G,PNC} f_{G,\psi} \Delta t)}{\sum_N (f_{G,T} \Delta t)}$$

式中，t 是 N 个时间步长 Δt 之后的当前时间；函数 f 表示依赖于底土层的增长率；PNC 是植物氮；ψ 是植物水潜势；T 是温度。

(3) 根部水分吸收模型：

$$U_W = (\psi_S - \psi)/(r_{soil} + r_{root})$$

式中，ψ_S 是土壤水潜势；ψ 是根系汇聚点的植物水分潜势；r_{soil} 是水流在土壤中的阻力；r_{root} 是水流在根部中的阻力。

水分从土壤经过植物体到达大气的传输模型

Kowalik P J, Eckersten H：在种树诺曼森林中水分从土壤经过植物体到达大气的传输 Ecological Modelling, 1984, 26

(1) 叶片水潜势 ψ_l：

$$\psi_l = \psi_{lm}(1 - V/V_0)$$

式中，V 是植物体中有效水的储量；V_0 是当没有水分压力时植物体中有效水的最大储量；ψ_{lm} 是 ψ_l 的最小值

(2) 热交换：

$$R_n = H + E\lambda + S_h$$

式中，R_n 是净辐射流；H 是热函；$E\lambda$ 是潜热流；S_h 是在叶片、茎和土壤中的热储量。

湿模式实验数值模型

罗哲贤：植被覆盖度对干旱气候影响的数值实验 地理研究，1985，4(2)

基本方程组：

$$\frac{\partial}{\partial t}\nabla^2\psi_1 - J\left(\psi_1, \nabla^2\psi_1 + \beta^* y\right) = f_0\frac{\omega_2}{\Delta p} - K_d'\nabla^2(\psi_1 - \psi_3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\nabla^2\psi_1 + J\left(\psi_3, \nabla^2\psi_3 + \beta^* y\right) - f_0 H^{-1} J(\psi_3, h) = -f_0\frac{\omega_2}{\Delta p} + K_d'\nabla^2(\psi_1 - \psi_3) - K_d'\nabla^2\psi_3$$

$$\frac{\partial\theta_1}{\partial t} + J(\psi_1, \theta_1) + \nabla\cdot(\theta_1\nabla\eta_1) + \left[\frac{\partial}{\partial p}(\omega\theta)\right]_1 = \frac{1}{C_{p1}' + C_{q1}'}\left(Q_3 - Lv_{w1}G_1 + Lk_{p31}\mu_1\omega_1\right)$$

$$\frac{\partial\theta_3}{\partial t} + J(\psi_3, \theta_3) + \nabla\cdot(\theta_3\nabla\eta_3) + \left[\frac{\partial}{\partial p}(\omega\theta)\right]_3 = \frac{1}{C_{p3}' + C_{q3}'}\left(Q_3 - Lv_{w3}G_3 + Lk_{p33}\mu_3\omega_1\right)$$

$$\frac{\partial w_1}{\partial t} + J(\psi_1, \theta_1) + \nabla\eta_1\cdot\nabla w_1 + \omega_1\left(\frac{\partial w_1}{\partial p}\right)_1 = vw_1\omega_1\frac{1}{p_1} + vw_1 G_1\frac{1}{w_1}$$

$$\frac{\partial w_3}{\partial t}+J(\psi_3,\theta_3)+\nabla\eta_3\cdot\nabla w_3+\omega_3\left(\frac{\partial w_3}{\partial p}\right)_3=$$

$$vw_3\omega_3\frac{1}{p_3}+vw_3G_3\frac{1}{w_3}$$

式中，ψ 为地转流函数；η 为速度势；θ 为位温；W 为全露点温度；ω 为垂直速度；Q、G 为非绝热加热及水汽源汇项；W、μ 为全水汽混合比及饱和混合比；h 为下边界地形面高度；K_d'、K_d 分别为垂直内摩擦系数及地面摩擦系数；f_0 为纬度 φ_0 处柯氏参数；$\beta^*=\mathrm{d}f/\mathrm{d}y$，$H$ 为均质大气高度；L 为临界潜热；V_W、V_μ 为 W、μ、v 的函数；V 为水汽混合比。

水文-植被混合模型

Huillet T, Lauga J：森林流域案例研究中的土壤 植物 水分模型．Ecological Modelling, 1985, 27

$$\frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}t}=\frac{E}{1+x_3\exp x_4S}-$$

$$\frac{R}{L_v(\Delta+\gamma)}\frac{1}{1+\frac{I}{1+I\Phi}}\left[(1-\exp(-S/x_7)\right]-$$

$$\frac{S_{\max}(\psi_s-\psi_f-he)/h}{r_r/L+\alpha/K(\psi_s)}$$

$$\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}=E\left(1-\frac{1}{1+x_3\exp x_4S}\right)-$$

$$(x_1H)^2-(H-x_0)/x_5$$

$$\frac{\mathrm{d}Q^G}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{x_2}(H-x_6)/x_5-\frac{1}{x_2}Q^G$$

$$\frac{dQ^S}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{x_{10}}RS-\frac{1}{x_{10}}Q^S$$

$$\frac{\mathrm{d}\psi_f}{\mathrm{d}t}=K_1(\psi_s-\psi_f-he)-$$

$$K_2\frac{R\Delta}{L_v(\Delta+\gamma)}\frac{I}{1+I/I\Phi}\frac{1}{1+(\psi_f/\psi_{f_1})^5}$$

$$\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}=a_0\left[\frac{1}{1+(t-120)^2}-\frac{1}{1+(t-283)^2}\right]$$

式中，$E=\inf(I,P)$；S 是土壤含水层的状态；H 是移动流体中的传送；I 是潜在的筛选率；Q^G 是地下径流；Q^S 是地表径流；RS 是无法下渗的水流；ψ_f 是土壤的水潜势；Δ 是饱和水汽压-温度关系式的斜率；R 是净辐射；γ 是湿度计常数；Lv 是水的蒸发潜热；$S_{\max}$ 是上层厚度；ψ_s 是土壤水潜势；K 是土壤水传导率；h 是从水头到水压力的转换因子；e 是植被覆盖的平均高度。

林地覆盖类型转换模型

Alig R J, Wyant J G：美国林地覆盖地区投影区面积的变化．Ecological Modelling, 1985, 29

$$A_{i,j,t+1}=\sum_{j=1}^{5}\sum_{k=1}^{3}P(D_{k(i,j,t)})P(FT_{i,j,t+1}/D_{k(i,j,t)})A_{i,j,t}$$

式中，$A_{i,j,t}$ 是在十年 t 中所有权 i 和森林类型 j 的森林面积($i=1,2,3$; $j=1,\cdots,5$; $t=1,\cdots,7$)；$P(D_{k(i,j,t)})$ 是在十年 t 中所有权 i 和森林类型 j 中以类型 k 为主要干扰的概率；$P(FT_{i,j,t+1}/D_{k(i,j,t)})$ 是在十年 $t+1$ 中所有权 i 的单位木材林面积存在于相应的十年 t 中那一单位面积上的以类型 k 为主要干扰的森林类型 j 的概率。

植被孤岛的种子散布模型

McClanahan T R：植被孤岛的种子散布 Ecological Modelling, 1986, 32

到达某一位置的种子密度：

$$Q_d=Ce^{-kd}$$

式中，Q_d 是给定距离下的种子密度；C 是初始种子密度；d 是离开种子源地的距离；k 是延迟常数。

总样地类内离差平方模型

李燕军：管岑山北部寒温性针叶林下草本植物分布特点分析 植物生态学与地植物学学报，1986, 10(3)

$$S=\sum_{t=1}^{k}\sum_{i=1}^{n_t}(x_{it}-\bar{x}_t)'(x_{it}-\bar{x}_t)$$

式中，n_t 为 t 类样地 G_t 中样地的个数；k 为样地类数；x_{it} 为 t 类样地 G_t 中的第 i 个样地的指标(为 m 维向量)；$\bar{x}_t$ 为 G_t 的中心。

植被类型的分布与气候的关系模型

徐文铎：中国东北主要植被类型的分布与气候的关系．植物生态学与地植物学学报，1986, 10(4)

(1) 温暖指数 WI 模型：

$$WI=\sum(t-5)$$

(2) 寒冷指数 CI 模型：

$$CI = \sum(5 - t)$$

(3) 温度指数 HI 模型：

$$HI = \frac{P}{WI}$$

式中，t 为月平均气温；P 为年降水量。

(4) 降水量变化规律模型：

$$P = P_0 + 0.28(h - h_0)$$

式中，P 为降水量；P_0 为已知海拔高度的降水量；h 为 P 的海拔高度；h_0 为 P_0 的海拔高度。

气孔和冠层传导力模型

王宏，杨春虹：农田小麦在土壤湿润条件下的气孔活动．生态学报，1986，6(4)

(1) 叶片气孔传导力 g_1 模型：

$$g_1 = g_d + g_b = \frac{r_d + r_b}{r_d r_b}$$

式中，r_d、r_b 分别为叶片近轴面和远轴面的气孔阻力；g_d，g_b 分别为叶片近轴面和远轴面的气孔传导力。

(2) 冠层传导力 g_c 模型：

$$g_c - \sum g_{1n} I_{la}$$

式中，n 为叶序；I_{la} 为叶面积指数。

刺槐对降雨的截持作用模型

王彦辉：刺槐对降雨的截持作用．生态学报，1987，7(1)

(1) 刺槐单株林木的林冠截持量模型：

$$\begin{cases} I_c = I_{cm}^*\left[1 - \exp\left(-\dfrac{pA}{I_{cm}^*}\right)\right] + 0.051T \\ I_{cm}^* = 1.48(\Delta H \cdot A)^{0.13}\Delta T^{0.09} \end{cases}$$

式中，I_{cm}^* 为林冠最大枝叶吸附量；A 为林冠纯郁闭度；ΔH 为林冠厚度；ΔT 为与上次降雨相隔天数；$pA = p_a$ 为捕捉雨量。

(2) 刺槐干流量模型：

$$S_f = 0.027 p^{1.185}$$

式中，P 为降雨量。

Log-线性模型

李景田：用列联表研究纬度和海拔高度对红杉分布的影响．植物生态学与地植物学学报，1987，11(2)

$$\ln F_{ij} = \hat{U} + \hat{U}_{A(i)} + \hat{U}_{B(j)} + \hat{U}_{AB(ij)}$$

式中，$\hat{U} = Z_{\bullet\bullet}$；$\hat{U}_{A(i)} = \bar{Z}_{A(i_\bullet)} - \bar{Z}_{\bullet\bullet}$；$\hat{U}_{B(j)} = \bar{Z}_{B(\bullet j)} - \bar{Z}_{\bullet\bullet}$；$\bar{Z}_{i_\bullet} = \frac{1}{c}\sum_{j=1}^{c}\ln F_{ij}$；$\hat{U}_{AB(ij)} = Z_{AB(ij)} - \bar{Z}_{A(i_\bullet)} - \bar{Z}_{B(\bullet j)} + \bar{Z}_{\bullet\bullet}$；$Z_{ij} = \ln F_{ij}$。

次生林类型判据模型

李绍忠：辽东三块石天然次生林的排序．植物生态学与地植物学学报，1987，11(4)

$$Y_0 = \frac{m_t}{m_t + m_{t+1}}\bar{Y}_t + \frac{m_{t+1}}{m_t + m_{t+1}}\bar{Y}_{t+1}$$

式中，Y_0 为判据；t 为类别；m_t, m_{t+1} 分别为第 t 类和第 $t+1$ 类的标准地数；$\bar{Y}_t, \bar{Y}_{t+1}$ 分别为第 t 类和第 $t+1$ 类的判别得分平均值。

相似系数法

李正大，张宏建：六盘山森林植被的数量分类．植物生态学与地植物学学报，1987，11(4)

$$B(j,k) = \frac{\sum_{i=1}^{p}\left|X_{ij} - X_{ik}\right|}{\sum_{i=1}^{p}\left|x_{ij} - x_{ik}\right|} \times 100$$

式中，$B(j,k)$ 为群落 j 与群落 k 的相似系数；X_{ij} 与 X_{ik} 分别为 i 群落中 j 物种与 k 物种数量的均值，x_{ij} 与 x_{ik} 分别为 i 群落中 j 物种与 k 物种数量的实测值。

林木生产力指数

向平南：林地资源质量定量评价方法探讨——以广西兴安县为例．自然资源，1988，2

$$y = \frac{\bar{h}_{ij}}{h_{ij}} \times 100$$

式中，$\bar{h}_{ij}$ 为实测的 i 树种 j 年龄的平均树高；h_{ij} 为平均生长过程中 i 树种 j 年龄的树高。

树冠截留量的模拟方程

徐嵩龄：森林-水资源系统的理论分析．自然资源学报，1988，3(4)

树冠的截留量是一个重要的水文参数，可用下述微分方程模拟：

$$\frac{d\phi}{dt}=\alpha\rho\left(\frac{\phi_0-\phi}{\phi_0}\right)^{\beta}$$

式中，ϕ 为单位叶片面积截留雨量；ϕ_0 为单位叶片面积饱和截留雨量；ρ 为降雨强度；t 为降雨时间；α 为；β 为待定常数

改进的 Penman 公式

张新时：植被的 PE(可能蒸散)指标与植被-气候分类(一)——几种主要方法与 PEP 程序介绍 植物生态学与地植物学学报，1989，13(1)

$$E_0=\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\left[R_a(1-r)\left(0.29\cos\varphi+\frac{0.52n}{N}\right)\right]-\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\left[\delta T_a^4\left(0.10+\frac{0.90n}{N}\right)\left(0.56-0.08\sqrt{ed}\right)\right]+\frac{\gamma}{\Delta+\gamma}\left[0.26\left(1+\frac{h}{20000}\right)\left(1+\frac{u}{100}\right)(ea-ed)\right]$$

式中，E_0 为蒸发量；Δ 为气温 T_a 时的饱和水汽压曲线斜率；R_a 为无大气时到达单位面积地面上的太阳总辐射量；r 为下垫面反射率；$\frac{n}{N}$ 为日照百分率；δT_a^4 为气温 T_a 时的黑体辐射；ea 为气温 T_a 时的饱和水汽压；ed 为平均水汽压；γ 为干湿球湿度公式常数；u 为高度 2 m 处的风速；φ 为纬度；h 为海拔高度。

人工种草地产量估算模型

侯光良、陈沈斌、刘允芬：宁夏天然草场产量与气候因子关系及人工草地产量估算，自然资源学报，1989，4(1)

(1) 在土壤肥力较高、水分供给充足、耕作管理精细的条件下，最大产量可按下式估算：

$$Y_{max}=K\cdot CH\cdot CT\cdot G\cdot y_0\frac{ET_{max}}{e_a-e_d}$$

(kg · hm^{-2} · 全生育期)

式中，CH 为收获指数，苜蓿第一年形成的干物质有 50%在根部，随后各年为 10%，因此，CH 可取 0.9；CT 为温度订正系数，全生育期平均温度为 5℃时取 0，10℃时取 0.2，15℃时取 0.4，20℃时取 0.55，25℃时取 0.6，30℃时取 0.6，35℃时取 0.5；G 为生长期，可用 5℃初、终日间天数代表；ET_{max} 为日最大蒸散量(mm)；e_a 为饱和水汽压(mb)；e_d 为实际水汽压(mb)；$y_o=Fy_0+(1-F)y_c$，$F=(R_{sc}-0.5R_s)/0.8R_{sc}$，$R_s$ 为实际射入的短波辐射(J · cm^{-2} · d^{-1})，R_{sc} 为晴天射入的短波有效辐射(J · cm^{-2} · d^{-1})，y_0 为完全阴天情况下的标准作物干物质产量(kg · hm^{-2} · d^{-1})，y_c 为晴天情况下的标准作物干物质产量(kg · hm^{-2} · d^{-1})；K 为苜蓿群体干物质产量经验修正系数，综合资料得到的数学表达式为：

$$K=\frac{Y_{max}}{CH\cdot CT\cdot G\cdot y_0\dfrac{ET_{max}}{e_a-e_d}}$$

(2) 在土壤肥力、耕作管理措施较好，仅靠天然降水条件的旱地最大亩产可按下式计算：

$$Y=Y_{max}\left[1-K_Y\left(1-\frac{ET}{ET_{max}}\right)\right]$$

(kg · hm^{-2} · 全生育期)

式中，ET 为实际蒸散量(mm)，在半干旱到干旱地区，土地平整耕作管理措施较好的耕地，可忽略从地表流走和渗透到耕作层之下的天然降水，这时可用天然降水量近似的代表实际蒸散量；ET_{max} 为日最大蒸散量(mm)，可用计算方法得到；K_Y 为产量反应因子。

最优轮伐期模型

王本楠：确定最优轮伐期的原则及数学模型 自然资源学报，1989，4(1)

(1) 简单的生长模型(木材最多轮伐期)：

$$\max_{0<t} MAI=Q(t)/t$$

式中，$Q(t)$ 为 t 龄时的林木积蓄，即生长函数。

(2) 简单的经济模型(收入最高轮伐期)：

由于不同龄级的立木价格不同，所以最大的生长量不一定获得最高的经济收入，在关心最高的年收益的情况下，则模型应修改为：

$$V(t)=P(t)Q(t)$$

式中，$P(t)$ 为 t 龄时的立木价格，此时 $V(t)$ 为 t 龄时的立木山价，因此要求：

$$\max_{0<t} V(t)/t=P(t)Q(t)/t$$

(3) 林租模型：

上述两个模型都没有考虑更新成本即借贷利率问题，一个考虑到更新成本的简单模型是林租模型。这个模型是使平均年净收益即林租(F_R)达到最大：

$$\max_{0<t} F_R=\frac{V(t)-C}{t}$$

(4) 净收益模型：

设利率为 r，因为更新成本、考虑到利率，是年增加的即 $C\cdot e^{rt}$。所以，在 t 年的现值应是 $V(t)-C\cdot e^{rt}$。净值模型的目标是使历次轮伐的现净值(PNW)达到最大。

$$\max_{0<t} PNW=[V(t)-C\cdot e^{rt}]/e^{rt}=V(t)e^{-rt}-C$$

由一阶条件：

$$\frac{\mathrm{d}PNW}{\mathrm{d}t}=V'(t)e^{-rt}-re^{-rt}V(t)=0$$

即得：

$$\frac{V'(t)}{V(t)}=r$$

因此，可以说明林分的增值率总不会大于利率 r，在等于 r 时为极大值，该林应砍伐。

(5) 土地期望价模型：

福氏特曼提出的最优轮伐期的模型是使土地期望价达到最大值：

$$\max_{0<t} LEV=\frac{V(t)-C}{e^{rt}-1}-C$$

这是一个简单的极值问题，其一阶条件是：

$$V'(t)(e^{rt}-1)-re^{rt}[V(t)-C]=0$$

二阶条件要求：

$$V''(t)(e^{rt}-1)-r^2e^{rt}[V(t)-C]<0$$

把土地期望价同利率相乘即得土地租价(R)，这就是可从土地获取的最大年租：

$$R=r\left\{\frac{[V(t)-C]}{e^{rt}-1}-C\right\}$$

式中，因 r 是常数，所以使土地租价最大等同于使土地期望价最大。

(6) 推广的模型：

设 $A(s)$ 为第 s $(0<s<t)$ 所花费的年净投资，即投入和获益之差。则：

$$LEV_g=\frac{V(t)-C-\int_0^t A(s)e^{r(t-s)}\mathrm{d}s}{e^{rt}-1}-C$$

使 LEV_g 达到最大值来确定最优轮伐期

根据一阶条件在最大值点有：

$$V'(t)=rV(t)+r\left[\frac{V(t)-C-\int_0^t A(s)e^{r(t-s)}\mathrm{d}s}{e^{rt}-1}-C\right]+A(t)$$

式中，$V'(t)$ 为最大年收益的变化率，即多等待一个时间周期(一年)所获取的超限年收入总量。右边是三个项：$rV(t)$ 是支持林木的成本；$rLEV$ 是支持土地的成本；$A(t)$ 多等一个时间周期的超限年净投资。

矮蒿草草甸植物蒸腾系数

杨福囤、沈振西、钟海民：矮蒿草草甸植物蒸腾强度的初步研究 植物生态学与地植物学学报，1989，13(2)

$$\text{蒸腾系数}=\frac{\text{平均蒸腾强度}(\mathrm{g\,dm^{-2}\cdot h^{-1}})\times\text{叶面积}(\mathrm{dm^2})\times\text{生长天数}\times\text{日平均日照时数}}{\text{平均干物质生产量}(\mathrm{g})}$$

可能蒸散 E_0 与月均温 T 的关系模型

张新时：植被的 PE(可能蒸散)指标与植被-气候分类(二)——几种主要方法与 PEP 程序介绍 植物生态学与地植物学学报，1989，13(3)

$$E_0=16\left(\frac{10T}{I}\right)^a$$

$$a=\left(0.675I^3-77.1I^2+17\ 920\quad I+492\ 390\right)\times10^{-6}$$

$$I=\sum_1^{12}\left(\frac{T}{5}\right)^{1.514}$$

式中，I 为 12 个月总和的热量指标；a 为因地而异的常数，是 I 的函数。

树木生长对于气候和前期生长的响应函数

吴祥定、孙力、谌绪志：利用树木年轮资料重建西藏中部过去气候的初步尝试 地理学报，1989，44(3)

$$Y=\sum_{i=1}^{m}a_iT_i+\sum_{j=1}^{n}b_jP_j+\sum_{k=1}^{l}c_kG_k$$

式中，Y 为树木年轮指数值；T，P 和 G 分别为经过正交化变换的逐月气温、降水值和树木前期生长量；a，b 和 c 为对应的回归系数；m，n 和 l 为相应于第 i，j 和 k 的因子数。

中条山地区表土花粉的回归分析方程

姚祖驹：山西中条山地区表土花粉分析 地理学报，1989，44(4)

$$P_{ij}=V_{ij}Y_{ij}+P_{0j}$$

式中，P_{ij} 为在样点 i 的第 j 种植物花粉的统计值；V_{ij} 为在样点 i 的第 j 种植物的统计值；Y_{ij} 为代表第 j 种植物和花粉之间关系的量，在几何学上相当于斜率；P_{0j} 代表样方外来 j 种植物的含量，在几何学上相当于截距。

Tharnthwaite Memorial 模型

侯光良，游松才：用筑后模型估算我国植物气候生产力．自然资源学报，1990，5(1)

$$NPP_{m,ET} = 3000\left(1-\exp\left[-0.000\,969\,5(T_e-20)\right]\right)$$

式中，T_e 为年平均蒸发量(mm)；t 为年平均气温(℃)；R 为年降水量(mm)。这种方法是在迈阿密模型(1)、(2)基础上发展起来的，是研究植物生产力的一种数学相关法。

$$NPP_{m,ET} = \frac{3000}{1+\exp(1.315-0.119t)}\left(g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}\right) \quad (1)$$

$$NPP_{m,R} = 3000\left[1-\exp(-0.000\,664R)\right]\left(g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}\right) \quad (2)$$

迈阿密模型是 Lieth 根据世界各地植物产量与年平均温度和年平均降水量之间关系做出来的。采用迈阿密模型估算某地植物气候生产力需用 Liebig 定律取二者中较低值做标准值。实际上，植物生育不仅只受温度或降水的影响，还受到其他气候因子的影响。基于此，Lieth 在 Tharnthwaite 基础上又提出了 Tharnthwaite Memorial 模型。蒸散量受太阳辐射、温度、降水、饱和差、风等气候因子影响，所以，(2)式估算的植物气候生产力较精确。

筑后模型

侯光良，游松才：用筑后模型估算我国植物气候生产力．自然资源学报，1990，5(1)

植物群体净第一性生物生产量(NPP)和蒸腾量(T_e)可以分别写成如下形式：

$$NPP = \int_0^{T_0} P_N(t)\mathrm{d}t \approx AT_0a_0a_1\overline{\left[(c_a-c_i)/(r_c'+r_{s,c})\right]} \quad (1)$$

$$T_e = \int_0^{T_0} E_T(t)\mathrm{d}t \approx AT_0b_0b_1\overline{\left[(e_i-e_a)/(r_c+r_{s,w})\right]} \quad (2)$$

水分利用效率(E_{WU})由(2)式除以(1)式得到，可以写成如下形式：

$$E_{WU} = \frac{NPP}{T_e} \approx \frac{a_0a_1\overline{(r_c+r_{s,w})}\,\overline{(c_a-c_i)}}{b_0b_1\overline{(r_c+r_{s,c})}\,\overline{(e_i-e_a)}} \quad (3)$$

式中，a_0 为 CO_2 通量对干物质产量换算系数；$b_0=0.622\rho/P$，ρ 是空气密度，P 是大气压力；a_1、b_1 分别为月平均对白天平均值的比例常数；r_c、r_c' 分别为植物群体对水汽和 CO_2 乱流输送阻抗；$r_{s,w}$、$r_{s,c}$ 分别为叶对水汽和 CO_2 的平均气孔阻抗；e_i、e_a 分别为植物内 Z_c 高度和参考高度 Z_R 水汽压；c_a、c_i 分别为植物群体上参考高度和群体内叶气孔 CO_2 浓度；——表示年平均值。

当土壤水分供给充足，植物生长很茂盛的情况下，此时植物群体的蒸腾量(T_e)几乎等于蒸散量(E_Σ)，即：

$$T_e \approx E_\Sigma = \frac{BR_n}{l(1+\beta)} \quad (4)$$

式中，E_Σ 为年蒸散量($t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$)；$R_n$ 为年净辐射量($kcal\cdot cm^{-2}$)；l 为年水的蒸发潜热($cal\cdot g^{-1}$)；β 为波恩比；B 为由 $g\cdot cm^{-2}\cdot a^{-1}$ 到 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ 变换因子。

当土壤水分供给充足、植物生长茂盛情况下的植物群体净第一性生产量(NPP)，成为最大净第一性生产量(NPP_m)，或称植物气候生产力，并根据(3)式和(4)式关系，可以化成如下形式：

$$NPP_m \approx \frac{a_0a_1\overline{(r_c+r_s)}\,c_a\overline{\left(1-\frac{c_i}{c_a}\right)}}{b_0b_1\overline{(r_c'+r_{s,w})}\,\overline{(e_i-e_a)}}\cdot T_e \approx \frac{a_0a_1\overline{(r_c+r_{s,w})}\,c_a\overline{\left(1-\frac{c_i}{c_a}\right)}}{b_0b_1\overline{(r_c'+r_{s,c})}\,\overline{(e_i-e_a)}}\cdot\frac{BR_n}{l(1+\beta)} \approx \frac{A_0R_n}{d(1+\beta)} \quad (5)$$

式中，$A_0 = \dfrac{a_0a_1B\overline{(r_c+r_{s,w})}\,c_a\overline{\left(1-\frac{c_i}{c_a}\right)}}{lb_0b_1\overline{(r_c'+r_{s,c})}}$；$d=\overline{(e_i-e_a)}$ 为群体内外水汽压差，在缺乏观测数据的情况下，可近似的用饱和差数值代替。根据(5)式可以看出：植物气候生产力的大小与净辐射(R_n)成正比，与 $d\cdot(H\beta)$ 成反比。饱和差(d)和波恩比(β)的数值一般是随着气候干燥度的增加而增加，它们的影响结果常常使植物气

候生产力往干燥气候地区趋于减少

数据变换模型

高琼：直接模糊聚类的截取水平选择及其在植被数量分析中的应用 植物生态学与地植物学学报，1990，14(3)

$$\hat{x}_{ij}=\frac{x_{ij}-x_{j\min}}{x_{j\max}-x_{j\min}}$$

式中，$\hat{x}_{ij}$ 为变换后的值；$x_{j\max}$ 和 $x_{j\min}$ 分别为属性变量 j 的最大值和最小值。

一年以上植株茎的年生产量 D_S 模型

金小华，刘宏刚，宋永昌：安徽歙县次生灌丛和灌草丛生产力的研究 植物生态学与地植物学学报，1990，14(3)

$$D_S=\sum_{j=1}^{S}\left(\sum_{i=1}^{n}d_{ij}\right)=\sum_{j=1}^{S}\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{D_{ij}}{l_{ij}}\right)$$

式中，l_{ij} 为第 j 种植物第 i 株的年轮数；D_{ij} 为第 j 种植物第 i 株茎的干重；d_{ij} 为第 j 种植物第 i 株茎的每年生产量；n 为第 j 种植物生产了一年以上的株数；S 为生产了一年以上木本植物的种数。

植被系统数学模型

高琼：植被系统中植物与环境因子相互作用的动态模拟 植物生态学与地植物学学报，1990，14(4)

(1) 植被系统的一般数学模型：

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{Y}}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{Y},\boldsymbol{Z})+\boldsymbol{w}_y(t)$$

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{Z}}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{g}(\boldsymbol{Y},\boldsymbol{Z})+\boldsymbol{w}_z(t)$$

式中，$\boldsymbol{Y}$ 为植被本身的状态向量；$\boldsymbol{Z}$ 为可调制因子向量；$\boldsymbol{f},\boldsymbol{g}$ 均为一向量函数；$\boldsymbol{w}_y$ 为外力的作用，如人工植被的配置或利用强度等；$\boldsymbol{w}_z$ 为非自然力的作用，如化学剂的施用等。

(2) 基本模型的局部线性近似模型：

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\alpha}}{\mathrm{d}t}=\left[F_y\right]\boldsymbol{\alpha}+\left[F_z\right]\boldsymbol{\beta}+\boldsymbol{F}_0+\boldsymbol{w}_y(t)$$

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\beta}}{\mathrm{d}t}=\left[G_y\right]\boldsymbol{\alpha}+\left[G_z\right]\boldsymbol{\beta}+\boldsymbol{G}_0+\boldsymbol{w}_z(t)$$

$$\boldsymbol{\alpha}(0)=\boldsymbol{\beta}(0)=0$$

式中，$\boldsymbol{\alpha},\boldsymbol{\beta}$ 分别为植被和环境因子对系统当前状态的偏离量。

植物气候生产力模型

袁嘉祖：黄土高原地区植物气候生产力 生态学杂志，1990，9(4)

(1) 植物气候生产力模型：

$$\mathrm{TSP}_t=\frac{300}{1+\exp(1.315-0.119t)}$$

$$\mathrm{TSP}_N=1-\exp(-0.000\,664N)$$

式中，TSP_t 和 TSP_N 分别为以温度和降水量算得的植物干物质产量；t 为年平均气温；N 为年平均降水量。

(2) 年平均实际蒸散量 V 模型：

$$V=\frac{1.05N}{\sqrt{1+\left(\frac{1.05N}{L}\right)^2}}$$

式中，N 为年平均降水量；L 为年平均蒸散量。

蒸腾强度与水量平衡模型

陈一鹗，刘康：渭水旱塬紫花苜蓿的蒸腾强度与水量平衡研究 水土保持通报，1990，10(6)

(1) 水量平衡方程：

$$S_{\mathrm{W1}}+R-S_{\mathrm{W2}}=E+T$$

式中，S_{W_1} 为生长季开始时的土壤储水量；S_{W_2} 为次年同期的土壤储水量；R 为降水量；E 为地面蒸发量；T 为植物蒸腾量。

(2) 水分利用率模型：

$$\text{水分利用率}=\frac{\text{年净初级生产量}}{\text{单位面积水分总蒸散量}}\times 100\%$$

沙棘林地上净初级生产量 P_n 模型

李代琼，从心海，梁一民：黄土高原半干旱区沙棘林净初级生产量与耗水量研究 水土保持通报，1990，10(6)

$$P_n=\Delta B+L+G$$

式中，ΔB 为生物量增量；L 为枯枝落叶量；G 为被动物采食的生物量。

林地水分条件与生产力模型

李钦荣，王佑民：黄土塬区刺槐林地水分条件与生产力研究 水土保持通报，1990，10(6)

(1) 刺槐林蒸腾耗水量模型：

$$E_{\mathrm{W}}=\sum_{i=1}^{n}E_iW_iT_i\times 10^{-10}$$

式中，E_W 为某时期的蒸腾耗水量；E_i 为日平均蒸腾强度；W_i 为每公顷林木的叶量；T_i 为日蒸腾时数；n 为该时期的蒸腾天数。

(2) 林地水分平衡方程：

$$W_1 = W_f + P_x - E_b$$

式中，W_1 为某一时段末期土壤储水量；W_f 为时段初期土壤储水量；P_x 为该时段降雨量；E_b 为该时期林地耗水量。

刺槐生长季节蒸腾耗水量 E_W 模型

刘康，陈一鹗：黄土高原沟壑区刺槐林水分动态与生产力的研究，水土保持通报，1990，10(6)

$$E_W = EWT \times 10^{-7}$$

式中，E 为刺槐的蒸腾强度；W 为刺槐叶量；T 为蒸腾时间，扣除降雨时间。

半球直接反射系数因子的计算公式

Kuusk A：大麦和苜蓿冠层的反射系数的角分布及植被指数，Remote Sensing of Environment, 1991, 37

$$\rho(\theta,\phi) = \frac{b(\theta,\phi)}{Q} \cdot \pi$$

式中，$b(\theta,\phi)$ 是辐射的测量值，θ 是天底角，$\phi = \phi_m - \phi'$ 是相对方位角，ϕ_m 和 ϕ' 分别是扫描和太阳的方位角，Q 是光谱日射强度计测量的谱辐照度。

林冠截留量 I 模型

刘向东，吴钦孝，赵鸿雁：黄土丘陵区人工油松林和山杨林林冠截留作用的研究，水土保持通报，1991，11(1)

$$I = p - p_i - s$$

式中，p 为落到林冠的降水；p_i 为林内降雨量；s 为树干径流量。

林木蒸散耗水量的气候估算公式

陈昌毓：甘肃河西走廊实际水资源及其对林木适生程度的影响，地理学报，1991，46(1)

(1) 乔木林基本正常生长并形成薪炭林的耗水量指标：

$$E = 0.16 \quad (\Sigma t \geqslant 10)$$

式中，E 为乔木林生长期的实际蒸散量；$\Sigma t \geqslant 10$ 为活动积温。

(2) 乔木林良好生长形成用材林的耗水量指标：

$$E_0 = \left\{ \frac{e_{(a+4)} - e_a}{1.84} \cdot 10^{\frac{Z}{18400(1+\alpha T_a)}} \times \left[(Q+q)(1+0.098\lg Z - 0.196)\left(0.202 + 0.643\frac{n}{N'}\right) \times (1-A) - S\delta T_K^4 \left(0.39 - 0.058\sqrt{e_d}\right) \times \left(0.1 + 0.9\frac{n}{N}\right) \right] \right\} \Bigg/ \left[\frac{e_{a+4} - e_a}{1.84} \cdot 10^{\frac{Z}{18400(1+\alpha T_a)}} + 1 + \frac{0.16(1+0.41V)(e_a - e_d)}{\frac{e_{a+4} - e_a}{1.84} \cdot 10^{\frac{Z}{18400(1+\alpha T_a)}} + 1} \right]$$

式中，E_0 为可能蒸散量($mm \cdot d^{-1}$)；e_a 和 e_d 分别是气温为绝对温度时气象台站测定的空气饱和水汽压和实际水汽压(mm)；$e_{(a+4)}$ 为温度比气温高 4℃时的饱和水汽压(mm)；Z 为台站海拔高度(m)；α 为气体膨胀系数(等于 1/273)；T_a 为百叶箱高度气温(℃)；$(Q+q)$ 为晴天碧空条件下的太阳总辐射可能值($mm \cdot d^{-1}$)；n 为日照时数($h \cdot d^{-1}$)；N' 为实际可能日照时数($h \cdot d^{-1}$)；N 为最大可能日照时数($h \cdot d^{-1}$)；A 为土壤、植被的反射率(取值 0.20)；S 为灰体系数(取值 0.9)；δ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数；V 为台站观测的风速($m \cdot s^{-1}$)；T_k 为绝对温度。

(3) 自然干燥度的计算式：

$$K = \frac{E}{\Sigma \gamma} = \frac{0.16(\Sigma t \geqslant 10)}{\Sigma \gamma}$$

式中，K 为自然干燥度；E 为可能蒸发量；Σt 为同期降水量。

(4) 实际干燥度的计算式：

$$K' = \frac{0.16(\Sigma t \geqslant 10)}{\Sigma \gamma - H}$$

式中，K' 为实际干燥度；H 为各县市绿洲日平均气温 $\overline{T}_{\text{日}} \geqslant 10$℃期间的实际灌溉水层厚度(mm)。

(5) 自然湿润度和实际湿润度的计算式：

$$\frac{1}{K} = \frac{\Sigma \gamma}{0.16(\Sigma t \geqslant 10)}$$

$$\frac{1}{K'} = \frac{\Sigma \gamma - H}{0.16(\Sigma t \geq 10)}$$

生长季节内油松的总蒸腾耗水量 E_W 模型

刘增文，王佑民：人工油松林蒸腾耗水及林地水分动态特征的研究．水土保持通报，1990，10(6)

$$E_W = \sum_{i=1}^{3}(E_i W_i)L \times 10^{-7}$$

式中，E_i 为各龄针叶的蒸腾强度；W_i 为各龄针叶的生物量；i 为叶龄；L 为蒸腾历时。

花粉分析公式

李文漪：神农架巴山冷杉林花粉与植物关系及其森林植被之演替．地理学报，1991，46(2)

（1）花粉汇集量公式：

$$P_y = \frac{P_c}{r}$$

式中，P_y 为称绝对花粉(absolute pollen)；P_c 为花粉浓度；r 为沉积物的沉积速率。

（2）花粉对植物的表现率：

$$R_a = \frac{P_a}{V_a}$$

式中，R_a 为花粉对植物的表现率；P_a 为 a 种植物花粉百分比；V_a 为 a 种植物在植被中的百分比。

草本生物量的预测方程

陈继平，陈昌利，陈刚：草本生物量与立地条件关系的研究．水土保持通报，1991，11(4)

$$\hat{y}_i = \sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{r_i}\hat{C}_{jk}\delta_i(jk)$$

式中，$\delta_i(jk)$ 为样方在类目中的反应，当第 i 个样方第 j 个项目的定性数据为 k 类目时 $\delta_i(jk)=1$，在其他情况下 $\delta_i(jk)=0$；$\hat{y}_i$ 为草本生物量的估计值；$\hat{C}_{jk}$ 为类目得分值。

Kappa 统计模型

Monserud R A, Leemans R：比较全球植被图和 Kappa 统计．Ecological Modelling, 1992, 62

Kappa 统计的简化方程 $\hat{\kappa}$ 如下：

$$\hat{\kappa} = \frac{p_0 - p_e}{1 - p_e}$$

式中，$p_0 = \sum_{i=1}^{c} p_{ii}$；$p_e = \sum_{i=1}^{c} p_{i.}p_{.i}$；$p_{i.} = \sum_{j=1}^{c} p_{ij}$；$p_{.i} = \sum_{j=1}^{c} p_{ji}$

种类 i 的 Kappa 统计 $\hat{\kappa}_i$ 如下：

$$\hat{\kappa}_i = \frac{p_{ii} - p_{i.}p_{.i}}{(p_{i.} + p_{.i})/2 - p_{i.}p_{.i}}$$

整个 Kappa 统计如下：

$$\hat{\kappa} = \frac{\sum_{i=1}^{c}(p_{ii} - p_{i.}p_{.i})}{\sum_{i=1}^{c}[(p_{i.} + p_{.i})/2 - p_{i.}p_{.i}]}$$

水分为限制因子的草地优化收获理论模型

高琼：水分为限制因子的草地优化收获理论的研究．植物生态学与地植物学学报，1992，16(2)

（1）水分为限制因子的草地植物生物量和土壤水分动态模型：

系统的一般模型：

$$\dot{w} = p(t) - tf(w,m,t)$$
$$\dot{m} = g(w,m,t) - u(t)m$$

式中，w，m 分别为土壤水分和单位面积的群落生物量；$p(t)$ 为降水速率；$u(t)$ 为收获比率强度；$f(w,m,t)$，$g(w,m,t)$ 分别为蒸散速率和生物量增长速率。

（2）优化收获理论——优化收获理论方程：

$$\begin{cases} \dot{w} = p(t) - tf(w,m,t) \\ \dot{m} = g(w,m,t) - u(t)m \\ \dot{\lambda}_1 = \lambda_1 \dfrac{\partial f}{\partial w} - \lambda_2 \dfrac{\partial g}{\partial w} \\ \dot{\lambda}_2 = \lambda_1 \dfrac{\partial f}{\partial m} - \lambda_2 \dfrac{\partial g}{\partial m} - (1 - \lambda_2)u \\ u(t) = \begin{cases} u_m & (\lambda_2 < 1) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \end{cases}$$

式中，λ_1，λ_2 分别为两个伴随变量；u_m 为一种收获力，表示控制着最多可能投入收获的能量因素。

蒸腾速率 T 模型

唐季林、徐化成：油松不同种源在北京地区水势和蒸腾速率的比较研究 植物生态学与地植物学学报，1992，16(2)

$$T=\frac{(\text{测后温度换算值}\times\text{温度}-\text{测前温度换算值}\times\text{温度})\times\text{测杯体积}}{\text{测定时间}\times\text{叶面积}}$$

水量平衡模型

康文星、田大伦等：杉木人工林水量平衡和蒸散的研究 植物生态学与地植物学学报，1992，16(2)

$$P=E+F+\Delta w$$

式中，P 为大气降水量；E 为系统总蒸散量；F 为径流量；Δw 为土壤蓄水变化量。

表面去除负荷 P_S 模型

皮宇，戴全裕、陈源高：水蕹菜对含银废水的净化功能研究 植物生态学与地植物学学报，1992，16(2)

$$P_S=\frac{Q(C_o-C_i)}{S\times1000}$$

式中，Q 为进水流量；C_o,C_i 分别为进、出水浓度；S 为有效净化面积。

最大截留率模型

胡建忠："最大截留量"并非最大"林冠截留量" 水土保持通报，1992，12(3)

(1) 最大截留率模型：

$$\text{最大截留率}=\frac{\text{枝叶吸水后重}-\text{枝叶吸水前重}}{\text{枝叶吸水前重}}\times100\%$$

(2) 最大截留率模型：

$$\text{最大截留量}=10^{-4}\times\text{最大截留率}\times\text{生物量}$$

(3) 林冠截留量 I_c 模型：

$$I_c=P-(P_t+P_b+P_s)$$

或

$$I_c=S_c+\hat{e}\gamma t$$

式中，P 为林外雨量；P_t 为通过雨量；P_d 为滴下雨量；P_s 为茎流雨量；S_c 为降雨终止时树体表面截留的雨量；$\hat{e}$ 为林冠投影面积内水湿树体表面的平均蒸发强度；γ 为水湿树体表面积对于树冠投影面积的比值；t 为降雨历时。

林地生产潜力模型

陈太友：湖北省楠竹分布及其生产潜力的开发 自然资源，1992，3

(1) 气候-植被生产力指数CVP模型：

$$\mathrm{CVP}=\frac{T_v\cdot N\cdot G\cdot E}{360\times100T_a}$$

式中，T_v 为最热月均温；T_a 为气温年较差；N 为年降水量；E 为蒸腾系数；G 为热均温≥7 ℃持续期。

(2) 森林生产潜力 P_{fp} 模型：

$$P_{fp}=\frac{0.564(Q+g)\cdot G\cdot N}{365E}$$

式中，$(Q+g)$ 为年太阳辐射量。

优质牧草产草量与气象条件的关系模型

庞庭颐，宾士益，陈家武等：华南引种优质牧草气候适应性的研究，自然资源学报，1992，7(3)

$$Y=-490.1277+0.4931\sum R+1.2451\sum S$$

$$\left(R=0.9651,\ F_{(0.01)}^{(2.5)}=13.3,\quad n=8\right)$$

式中，Y 为狗尾草产草量(kg·亩$^{-1}$，干草量)，$\sum R$、$\sum S$ 分别为同期降水量和日照时数。

热带优质牧草越冬寒害指标

庞庭颐，宾士益，陈家武等：华南引种优质牧草气候适应性的研究，自然资源学报，1992，7(3)

$$T_c=-\int_{i=1}^{n}(T_i-T_0)\mathrm{d}t$$

或

$$T_c=-\sum_{i=1}^{n}(T_i-T_0)\,\Delta t$$

式中，T_c 为有害积寒量，是一种低温危害积温，T_0 为热带牧草平流寒害临界温度，即 $T_0=8°\mathrm{C}$；T_i 为某次寒害过程的逐日均温；t 为时间，以 d 为单位。为了与0 ℃以下的负积寒量相区别，T_c 值取正值，所以上式前加"−"号。寒害过程气温越低，T_c 值越大，热带牧草受害越重。

若某个冬季有数次寒害天气过程出现，该年冬季热带牧草的有害积寒量可用下式表示：

$$T_w=-\int_{i=1}^{m}\int_{i-1}^{n}(T_i-T_0)\mathrm{d}t\mathrm{d}g$$

式中，T_w 为某个冬季热带牧草的有害积寒量；m 为某个冬季热带牧草寒害过程的总次数；g 为次数。

温带优质牧草越夏高温指标

倪庭顾，贾士益，陈家武等：华南引种优质牧草气候适应性的研究，自然资源学报，1992，7(3)

$$T_h = \int_{i=1}^{n} |T_{mi} - T_{m0}| dt$$

式中，T_h 是温带牧草有害积热量，是一种高温危害积温。T_{mi} 为热害过程的逐日最高气温；T_{m0} 为温带牧草热害的临界最高气温，即 $T_{m0} = 33°C$；t 为时间，以 d 为单位。某次热害过程 T_h 值越大，温带牧草受热害越重。

若某年夏季间断出现多次热害天气过程，该年夏季温带牧草有害积热量可用下式表示：

$$T_s = \int_{i=1}^{m} \int_{i=1}^{n} |T_{mi} - T_{m0}| dt dg$$

式中，T_s 为某年夏季温带牧草的有害积热量，m 为某年夏季热害天气过程的总次数，g 为次数。

自然植被净第一性生产力的估算与分布模型

张宪洲：我国自然植被净第一性生产力的估算与分布. 自然资源，1993，1

(1) 迈阿密模型：

$$NPP_t = \frac{3000}{1 + \exp(1.315 - 0.119t)}$$

$$NPP_R = \frac{3000}{1 - \exp(-0.000\,664R)}$$

式中，NPP_t 为根据年平均气温得到的净第一性生产力；NPP_R 为根据年平均降水量得到的净第一性生产力；t 为年平均气温；R 为年平均降水量。

(2) 桑斯维特模型：

$$NPP_e = 3000 \cdot [1 - \exp[-0.000\,969\,5(E - 20)]]$$

$$E = \begin{cases} R & (R < E_0) \\ E_0 & (其他) \end{cases}$$

式中，NPP_e 为由实际蒸散量所求得的净第一性生产力；E 为年实际蒸散量；E_0 为最大蒸散量。

(3) 筑后模型：

$$NPP = 0.29 \cdot \exp\left[-0.216 \cdot (I_{rd})^2\right] \cdot R_n$$

式中，R_n 为净辐射；I_{rd} 为辐射干燥度；NPP 为自然植被净第一性生产力。

人工降雨小区内的水量平衡模型

高鹏，王礼先：密云水库上游水源涵养林效益的研究. 水土保持通报，1993，13(1)

$$P = R + E + \Delta W$$

式中，P 为降雨量；R 为径流深；E 为蒸发量；ΔW 为土壤内的水分变化量。

叶子重量损失与叶子氮素浓度变化关系模型

耿晓源，Pastor J，Dewey B：长白山某些树种叶子的分解动态研究. 植物生态学与地植物学学报，1993，17(1)

$$Y_W = A + BX$$
$$Y_N = (A + BX)(X / N)$$

式中，Y_W 为叶子重量残留率(%)；X 为某一时刻叶子的氮素浓度(%)；Y_N 为某一时刻叶子的氮素残留率；N 为叶子初始氮素浓度；A、B 为拟和参数。

雨滴当量射程计算公式

郭战国：水力喷草技术在防治水土流失中的应用. 水土保持通报，1993，13(4)

$$R = f\sqrt{dH}$$

式中，f 为射程系数；d 为喷嘴当量直径；H 为喷嘴压力。

人工草地生产潜力 y 的估算模型

聂庆华，宋桂琴：黄土高原沟壑区人工草地生产力研究——以长武王东沟试验区苜蓿地为例. 水土保持通报，1993，13(5)

$$y = y_0 f(T) f(W) f(S) f(d)$$

$$y_0 = KC(1 + W_1)(1 + N) \cdot h^{-1} \sum_{i=1}^{n} \{Q_{PARi}(1 - \alpha)\varphi a_i (1 - a_i') \cdot [\beta_i + R(1 - \beta_{ti})][1 - R_{ti})(1 - g_i)]\}$$

式中，y_0 为光能生产潜力；K 为经济系数；C 为换算系数；W_1 为牧草含水量；N 为干草中灰分含量；h 为每形成 1000 g 干物质所需热量；α 为牧草反射率；φ 为量子转换系数；a_i、a_i' 分别为群体受光率和非光合器官受光率；R 为群体对超过饱和光强部分的光能利用率；g_i 为茎叶死亡率；β_i 为由牧草光饱和强度所决定的光能利用率；R_n 为呼吸损耗系数；Q_{PARi} 为光合有效辐射；$f(T)$、$f(W)$、$f(S)$、$f(d)$ 分别为温度、水分、土肥及其他突发性因子对产量的效应函数。

水热模式

卫林：反映植物形状特征的 W-T 模式．自然资源，1993，6

$$Q = a - br + cr^2$$

$$r = \sqrt{\left(\frac{A\cos\theta + B\sin\theta}{m}\right)^2 + (A\sin\theta + B\cos\theta)^2}$$

式中，$A=(T-T_0)$；$B=(W-W_0)$；Q 为植物形状特征量；θ 为椭圆长轴 AB 与横轴 CD 夹角；(W_0,T_0) 为圆心坐标；$m = A'B'/C'D'$；a，b 和 c 为参数。

林木发育节律模型

江泽平：检皮栎叶芽休眠解除过程的模拟。地理研究，1994，14(1)

(1) 发育速率：

$$M(t) = f(G,F,t)$$

式中，$M(t)$ 为发育速率；G 为林木的生长能力，取决于林木低温需要的满足程度；F 为温度潜力；t 为时间。

(2) 发育状态：

$$S(t) = \int_0^t M(t)\,d\tau$$

式中，$S(t)$ 为发育状态。

(3) 生长能力函数：

$$G(t)=\begin{cases} 0 & (C(t)<C_A) \\ \dfrac{1-\Delta G(t)}{C_0-\Delta G(t)-C_A}\times\{[G(t)-C_A]+G(t)\} & (C(t)\in[C_A,C_0-\Delta C(t)]) \\ 1 & (C(t)>C_0-\Delta C(t)) \end{cases}$$

式中，$C(t)$ 为低温状态；$\Delta G(t)$ 为驱温引起的生长能力的增量；$\Delta C(t)$ 为驱温引起的低温需要量的减量；$C(t) = \int_0^t M_{ch}(t)dt, M_{ch} \in [0,1]$。

$$M_{ch} = \begin{cases} 0 & (T<0^\circ C \text{ 或 } T>T_2) \\ a_1T+b_1 & (T\in(0,T_1)) \\ a_2T+b_2 & (T\in(0,T_2)) \end{cases}$$

式中，a_1，a_2，b_1 和 b_2 为参数；T_1，T_2 分别为能满足林木低温需要的最佳、上限温度。

$$\Delta G(t)=\begin{cases} 0 & (T<T_3) \\ \dfrac{\Delta G_m}{T_4-T_3}(T-T_3) & (T\in(T_3,T_4)) \\ \Delta G_m & (T>T_4) \end{cases}$$

式中，$\Delta G_m(t)$ 为驱温引起的生长能力的最大增量；T_3、T_4 分别为能产生 $\Delta G(t)$ 的温度下、上限。

$$\Delta C(t)=\begin{cases} 0 & (T<T_3) \\ \dfrac{\Delta C_m}{T_4-T_3}(T-T_3) & (T\in(T_3,T_4)) \\ \Delta C_m & (T>T_4) \end{cases}$$

式中，$\Delta C_m(t)$ 为驱温引起的低温需要量的最大减量。

(4) 温度潜力 F 的计算公式：

$$F(t)=\begin{cases} 0 & (T\leqslant B) \\ 17.8/\{1+19\exp[-0.331(T-B)]\} & (T>B) \end{cases}$$

式中，$F(t)$ 为温度潜力；B 为林木的基点温度

植物对大气污染反应的机械论分析模型

Winner W E：植物对大气污染反应的机械论分析．Ecological Applications，1994，4(4)

(1) 对于气态污染物，例如臭氧、有叶植物的总吸收量 J 如下：

$$J_{O_3} = O_{3ads} + O_{3abs}$$

式中，J_{O_3} 是总的臭氧吸收率；O_{3ads} 是吸附到有叶植物外表面的臭氧比率；O_{3abs} 是通过气孔进入叶肉的臭氧的比率。

(2) 叶片总的大气污染吸收率为：

$$J_{O_3} = (O_{3in} - O_{3out})F/L$$

式中，J_{O_3} 总的臭氧吸收率；O_{3in} 是进入一个烟熏室的臭氧浓度；O_{3out} 离开烟熏室的臭氧浓度；L 是叶片面积；F 是流动率。

(3) 气态大气污染物的导通系数可表示为：

$$g_{xgas} = g_{H_2O}(D_{xgas}/D_{H_2O})$$

式中，g_{xgas} 是气孔对任何气体的导通率；g_{H_2O} 是气孔对水汽的导通率；D_{xgas} 是对任何气体的扩散率；D_{H_2O} 是对于水汽的扩散率。

整体间隙率

朱启疆，范闻华，刘来福等：森林间隙率模型与模型验证．环境遥感 1995，10(1)

$$E_{gap} = \exp[-\lambda\Omega(1-q)/\sin\theta]$$

式中，q 为光线穿越单株树木的间隙率；λ 为样方单位面积内树木的株数；Ω 为样方中所有树冠的沿与入射光线方位正交方向且过树干的垂直截面面积的均值。

糙率系数

张洪江，北原曜，远藤泰造等：晋西不同林地状况对糙率系数 n 值影响的研究．水土保持通报，1995，15(2)

（1）曼宁公式：

$$C = \frac{1}{n}R^{1/6}$$

式中，C 为谢才系数；n 为糙率系数；R 为水力半径

（2）巴甫洛夫斯基公式：

$$C = \frac{1}{n}R^{y}$$

式中，y 为一无量纲变数，

（3）糙率系数 n 值模型：

$$n = \frac{1}{q}h^{5/3}i^{1/2}$$

式中，q 为单宽流量；h 为水流深；i 为动水比降。

水分平衡模型

Neilson R P：预测大陆植被分布和水分平衡的模型．Ecological Applications，1995，5(2)

（1）树冠拦截和蒸发：

$$E_p = k_e(P_t - S_a) \qquad E_p < L_{imit_e}$$

$$L_{imit_e} = \begin{cases} L_{imit_w} & (\text{PET} < 50) \\ L_{imit_s} & (\text{PET} > 50) \end{cases}$$

$$I_{nt_c} = E_p I_{nt_m}\left[1 - e^{-(I_{lag}+I_{law})}\right]$$

式中，E_p 为月内活动的数量；k_e 为常数；P_t 为本月总降水量；S_a 为本月积雪的等融水量；L_{imit_e} 为每月活动的最大数量；L_{imit_w} 和 L_{imit_s} 分别为冬季和夏季每月的最大活动；I_{nt_c} 为总的树冠拦截量；I_{nt_m} 为充分郁闭树冠的最大潜在拦截量；I_{lag} 为草本的叶面积指数；I_{law} 为木本植被的叶面积指数。

（2）地表水渗透部分转变成地表径流：

$$R_s = (S_m + P_t)\left(\frac{W - W_m}{W_s - W_m}\right)^{k_{s1}}$$

$$q_{Inf} = (S_m - P_t) - R_s$$

式中，R_s 为地表径流；S_m 为融雪水；P_t 为直流降水量；W 为当前土壤湿度；W_m 为潜在土壤湿度矩阵；W_s 为饱和土壤湿度；k_{s1} 为有关土层的常数；q_{Inf} 为最大潜在渗透率。

（3）水分渗透到下土壤一层：

$$q_{sat\,i} = (W_i - W_{fi})k_{s1i}\left(\frac{W_i - W_{fi}}{W_{si} - W_{fi}}\right)^{k_{s2i}} \qquad (W_i > W_{fi})$$

$$q_{unsat\,i} = (W_i - W_{mi})k_{u1i}\left(\frac{W_i - W_{mi}}{W_{si} - W_{mi}}\right)^{k_{u2i}} \qquad (W_i > W_{mi})$$

式中，W_{si}，W_{fi} 和 W_{mi} 分别是饱和时的土壤湿度、土地容量和潜力矩阵；q_{sati} 和 q_{unsati} 分别是土层 i 饱和和不饱和时的渗透率；W_i 是土层 i 当前土壤湿度；四个常数（k_{s1i}，k_{s2i}，k_{u1i}，k_{u2i}）分别为每一个土层所校准。

（4）实际的蒸腾作用（T_a）：

$$T_{ai} = \text{PET}\{1 - \exp[-(k_{ati}Co_{ci})]\}$$

$$Co_{ci} = \frac{I_{lat_i}}{I_{lan_m}}\frac{Co_{si}}{Co_{mij}} \qquad \frac{D_{lai}}{T_{ai}} < \text{WUE}_i$$

式中，Co_{ci} 是生活型 i 的树冠蒸腾作用导通率；P_{ET} 是潜在蒸腾率；Co_{si} 是气孔的导通率；Co_{mij} 是温热地带 j 的最大气孔导通率；I_{lam} 是正常状况下使用的最大 I_{la}；k_{ati} 是一个依赖于植物生活型的常数并把实际 I_{la} 的转换成树冠有效 I_{la}；WUE_i 是每一种生活型的最大水分利用效率；D_{la} 是叶面积持续时间。

森林植被带三维空间分布规律的经验方程

方精云：东亚地区森林植被带的三维空间分布．地理学报，1995，50(2)

（1）亚热带热带林（R =0.90）：

$$H = 1180 - 2110\sin^3 L - 0.55L(L_0 - 80)$$

（2）暖温带常绿阔叶林（R =0.93）：

$$H = 3750 - 3260\sin^5 L - 23.72(L_0 - 80) + 30.43(L_0 - 80)L - 1859(L_0 - 80)\sin L$$

（3）准温带落叶阔叶林（R =0.93）：

$$H = 3930 - 5075\sin^3 L - 24.66(L_0 - 80) - 3.44/(L_0 - 80)$$

(4) 亚寒带针叶林(R =0.94):

$$H = 4850 - 5500\sin^3 L - 21.96(L_0 - 80)$$

式中,H 为分布上限的高度(m);L 和 L_0 分别为地理纬度和经度(°);R 为相关系数。

林木分布度

朱有军,王幼民:混农林林木分布度的计算方法探讨 水土保持通报,1995,15(3)

$$E = \frac{\sum_{1}^{h}\sum_{\theta=1}^{8}\left[\left(d_{ij} + \Delta d\right)_{\min}\right]_{\theta}\frac{p_j}{1-p_j}}{\frac{(D_a)_u}{2\times\sqrt{\frac{n}{A}}}}$$

式中,$\left(d_{ij}\right)_{\min}$ 为在不同方位角 θ 上,最相邻接的那一对含点面积单元的距离;Δd 为距离增量;p_j 为第 j 个含点面积单元所占的概率;$(D_a)_u$ 为上限状态下的实际距离总和;A 为地域面积;n 为标准地 A 中所包含的点数。

常绿阔叶林永久样地的非线性排序模型

李旭光:四川江津四面山常绿阔叶林永久样地的非线性排序 植物生态学与地植物学学报,1995,19(3)

(1) DPC 分析——F 比率模型:

$$F = \frac{R^2/2}{\left(1-R^2\right)(N-2-1)}$$

式中,R^2 为多元测定系数;N 为样方数。

(2) NMDS 分析——应力 SR 模型:

$$SR = \sqrt{\frac{\sum_{i<j}^{M}(d_{ij} - \hat{d}_{ij})}{\sum_{i<j}^{M}d_{ij}^2}}$$

式中,d_{ij} 为排序样方间的距离;$\hat{d}_{ij}$ 为原始数据的每对样方间距离 d_{sij} 的回归估计值;d_{sij} 为原始数据样方间的距离;$M = \frac{N(N-1)}{2}$,N 为样方数。

林冠对降雨势能的减少量ΔE 模型

周光益,曾庆波,黄全等:热带山地雨林林冠对降雨的影响分析 植物学雨地植物学学报,1995,19(3)

$$\Delta E = m_{\text{jie}}gH - m_{\text{jing}}H + m_{C}g(H - h)$$

式中,m_{jie}、m_{jing} 和 m_C 分别为截流雨量、茎流雨量和穿透雨量;H、h 分别为平均树高和平均林冠下层高。

自然植被净第一性生产力模型

周广胜,张新时:自然植被净第一性生产力模型初探 植物生态学与地植物学学报,1995,19(3)

(1) 区域蒸发模式:

$$E = \frac{rR_n\left(r^2 + R_n^2 + rR_n\right)}{\left(r + R_n\right)\left(r^2 + R_n^2\right)}$$

(2) 自然植被的净第一性生产力 NPP 模型:

$$NPP = I_{rd}\cdot\frac{rR_n\left(r^2 + R_n^2 + rR_n\right)}{\left(r + R_n\right)\left(r^2 + R_n^2\right)}\times\exp\left(-\sqrt{9.87 + 6.25I_{rd}}\right)$$

式中,E 为蒸散量;r 为降水量;R_n 为净辐射量;I_{rd} 为辐射干燥度。

影响力函数

Emanuel W R:干扰景观的碳循环模拟 Ecological Modelling,1996,88

$$f(c,t) = \begin{cases} -\frac{1}{A_T}f_h^T(t)A(c,t) & (0 < c \leqslant c_{\max}) \\ f_h^T(t) & (c = 0) \end{cases}$$

式中,A_T 是总面积;$f_h^T(t)$ 是收获面积;$A(c,t)$ 是在时间 t、碳密度为 c 时陆地单元中所包含植被的面积。

杉木人工林水热优化模型

罗天祥,温远光:广西杉木人工林生产力水热优化模型 自然资源学报,1996,11(1)

(1) 杉木林分生产力的计算公式:

$$\Delta p_b = \sum\left(\frac{W_S}{A_S} + \frac{W_{BK}}{A_S} + \frac{W_B + L_B}{A_B} + \frac{W_L}{A_L} + \frac{W_R}{A_S}\right)$$

式中,Δp_b 为生产力;W_S,W_{BK},W_B,W_L 和 W_R 分别是干材、干皮、树枝、针叶和树根的现存量;A_S 为树干(林分)年龄;L_B 为树冠上枝条年龄(即枝下高处的树干年龄)内的凋落物修正量(按 $W = -1.12479 - 0.40852A + 0.099631A^2$ 计算,其值乘以凋落物中枝条比例 18.47±1.25%);A_B 为枝下高处树干年龄,即枝条年龄(经大量树干解析分析结果,中龄

林取 7a，近熟林取 8a，成熟林取 10a）；A_L 为树冠上针叶的加权平均年龄(取 2a)。

(2) 杉木水热优化模型的计算：

$$Y=\sum_{i=1}^{p} bi\cdot f(xi-ki)+a$$

式中，Y 为生产力；bi 为变量系数；a 为常数项；p 为生态因子数，ki 为某一生态因子参数(具有可解释的生态学意义)。

(3) 杉木生产力水热优化模型：

1) 杉木生产力水热优化模型：

因变量	生物生产力（$t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$）	材积生产力（$m^3\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$）
方程式	$P_b=15.8905-5.31672\times10^{-5}X_1^{2.5}+0.0046239X_2^2-2.1998(X_3-2.3)^2$	$P_v=14.0755-3.0735\times10^{-7}X_1^{3.5}-4.06431\times10^{-6}X_2^4-2.87359(X_3-2.6)^2$
F	30.5978	23.9621
R	0.6918	0.6467
S	3.0598	3.4812

式中，X_1 为温暖指数；X_2 为湿度指数；X_3 为水热系数。$n=104$。

2) 水热优化模型的偏相关系数：

因变量	$X_1^{k_1}$	$X_2^{k_2}$	$(X_3-k_3)^2$
生物生产力	−0.5043	0.1177	−0.3665
材积生产力	−0.5262	0.1447	−0.3128

式中，k_1,k_2 和 k_3 在生物生产力模式中分别为 2.5，2，2.3，而在材积生产力模式中则分别为 3.5，4，2.6。

区域蒸散模型

周广胜，张新时：中国气候-植被关系初探。植物生态学报，1996，20(2)

$$E=\frac{rR_n(r^2+R_n^2+rR_n)}{(r+R_n)(r^2+R_n^2)}$$

式中，E 为均一平坦下垫面的区域实际蒸散量；R_n 为年净辐射量；r 为年降水量。

垂直自然带在青藏高原东南部分布的数学模型

郑远长，王美娟，吴正方：青藏高原东南部自然带垂直分布的数学模型及生态学研究。自然资源学报，1996，11(3)

(1) 自然地带性(包括水平地带性与垂直地带性)规律：

$$T=44.9\cos^2(\Phi-6.5)-1.78$$

(2) 针阔叶混交林带上限分布模型：

$$H=\exp(0.4877+0.1496x+0.0608y-0.0008x^2-0.0014y^2)$$

$n=46$　　$R=0.9025$

(3) 暗针叶林带上限分布模型：

$$H=\exp(-0.1415+0.1264x+0.1797y-A)$$

$n=65$　　$R=0.9250$

$A=0.0007x^2-0.0029y^2$

(4) 高山灌丛草甸带上限分布模型：

$$H=\exp(3.1309+0.1758x+0.2401y-B)$$

$n=43$　　$R=0.9574$

$B=0.0010x^2-0.0036y^2$

式中，H 为自然带分布高度(m)；x 为东经；y 为北纬。经过方差分析，它们均达到 0.01 水平上的显著相关，表示模型的统一性及可行性。

中国植被净初级生产力计算公式

李克让，陈育峰：全球气候变化影响下中国森林的脆弱性分析。地理学报，1996，51(增刊)

$$NPP=I_{rd}\frac{rR_n(r^2+R_n+rR_n)}{(R_n+r)(R_n^2+r^2)}\times\exp\left[-(9.87+6.25I_{rd})^{1/2}\right]$$

式中，NPP 为植被净初级生产力；r 为年降水量；$R_n=I_{rd}\cdot r\cdot L$ 为净辐照量，L 为蒸发潜热，$L=597-0.57\ T$，T 为年平均气温，$I_{rd}=(0.629+0.237\times R_{pe}-0.00313\times R_{pe}^2)^2$ 为辐射干燥度，R_{pe} 为 Holdridge 可能蒸散率。

东北阔叶红树林全球气候变化响应分析公式

吴正方，邓慧平：东北阔叶红树林全球气候变化响应研究。地理学报，1996，51(增刊)

(1) 植物生长模型：

$$G=G_{max}f_1(x_1)f_2(x_2)\cdots f_i(x_i)$$

式中，G 为实际生长；$f_i(x_i)$ 为第 i 个环境因子对植物生长的影响函数(其值介于 0~1 之间)；G_{max} 为可实现

最大生长

(2) 水-热影响函数:

$$f(R_{pe},D_{gd})=f(R_{pe})f(D_{gd})$$

式中，$f(D_{gd})=4(D_{gd}-D_{gd_{min}})\times(D_{gd_{max}}-D_{gd})/(D_{gd_{max}}-D_{gd_{min}})^2$，$D_{gd}$ 为树木生长地的≥0℃生长度日，$D_{gd_{max}}$ 为树种分布区≥0℃生长度日上限，$D_{gd_{min}}$ 为树种分布区≥0℃生长度日下限；$f(R_{pe})=4R_{pe}(R_{pe_{max}}-R_{pe})/R_{pe}{}^2{}_{max}$，$R_{pe}$ 为树木生长地的潜在蒸散率，$R_{pe_{max}}$ 为树种分布区内水分条件最差的潜在蒸散率。

气候-森林响应动力学模型中的生物过程方程

陈育峰：气候-森林响应过程敏感性的初步研究. 地理学报, 1996, 51(增刊)

生物过程	方程	含义
种子的可获性	$A_S=\Sigma[D_{seen}(H_n/H_{maxn})^2]$	A_S 为某树种可供发芽的种子数；D_{see} 为最大种子产量；H_n 和 $H_{max,n}$ 为其他树木的高度和最大高度
材积增长率	$\frac{d(D^2H)}{dt}=R\cdot L_a\cdot\frac{1-DH}{D_{max}H_{max}}$	L_a 为叶面积；R 为常数；D_{max} 为最大胸径；H_{max} 为最大树高
胸径增长率	$\frac{dD}{dT}=\frac{GD[1-DH/(D_{max}H_{max})]}{274+3b_2D-4b_3D^2}$	$b_2=2(H_{max}-137)/D_{max}$；$G$ 为常数； $b_3=(H_{max}\ \ 137)/D^2{}_{max}$
可获得的光照与荫蔽性	$rgf(n)=\begin{cases}1.0-\exp\{[-4.64(L_a-0.05)]\} & (n=1)\\ 2.24[1.0-\exp\{[-1.136(L_a-0.080)]\} & (n=3)\end{cases}$ $L_a=\Phi\cdot e^{-k\cdot SHADE}$ $SHADE=\Sigma(H_n+H_0)A_{sln}/H_n$ $A_{sl}=114w_l^{0.9}$ $1/w_l=1/(0.124\ w_s^{0.794})+1/125$ $w_s=0.313(D^2H)^{0.9733}$	n 为定性常数.取值为1时表示树种耐荫；取值为3时表示树种不耐荫；L_a 为树木可得到的光照；$\phi=1.0$；$k=0.025$；H_n 为其他树木的高；H_0 为本身树高；A_{sln} 为其他树木的叶面积；w_s 为茎重；w_l 为叶重(kg)；D^2H 为体积(m^3)；A_{sl} 为叶面积(m^2)
死亡率	$P_m=1-(1-4/A_{max})^t$	P_m 为死亡概率；A_{max} 为最大年龄。

植被净初始生产力的 Uchijma 模型

朱志辉：我国自然植被生产力功能和地带性结构的气候耦合。地理学报，1996，51(增刊)

$$NPP=f(I_{rd})R_n$$

式中，NPP 为植被净初始生产力($t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$)；$I_{rd}$ 为年辐射干燥指数；R_n 为年净辐射；f 是 I_{rd} 的一种函数。

冠层表面阻力与环境因子关系模型

裴兴国：冠层表面阻力与环境因子关系模型及其在蒸散估算中的应用. 地理研究，1997，16(2)

(1) 冠层表面阻力计算公式：

$$r_c=r_a\left(1+\frac{\Delta}{\gamma}\right)\left(\frac{L_{em}}{L_e}-1\right)$$

式中，r_c 为冠层表面阻力；$r_a=\frac{U}{u_*^2}$，r_a 为水汽和热量的空气动力学阻力，U 为风速，u_*^2 为摩擦速度；Δ 为饱和水汽压-温度曲线斜率；γ 为干湿常数；L_e 为蒸散潜热；L_{em} 为土壤-作物系统不受水分威胁时的蒸散潜热。

(2) 冠层表面阻力与环境因子关系模型：

$$r_c=r_{c\,min}[F_1(S_t)F_2(D)F_3(T)F_4(\theta)]^{-1}$$

式中，$r_{c\,min}$ 为最小冠层表面阻力；S_t 为太阳总辐射；D 为饱和水汽压差；T 为气温；θ 为土壤含水量；$F_1(S_t)$ 为太阳辐射胁迫函数；$F_2(D)$ 为饱和水汽压差胁迫函数；$F_3(T)$ 为温度胁迫函数；$F_4(\theta)$ 为土壤水分胁迫函数；$F_1(S_t)=\frac{S_t(1000+a_1)}{1000(S_t+a_1)}$，$F_2(D)=\frac{1}{1+a_2D}$，$F_3(T)=1-a_3(T-25)^2$，$F_4(\theta)=1-a_4\frac{\theta_f-\theta_w}{\theta-\theta_w}$，$a_1$，$a_2$，$a_3$ 和 a_4 为参数，θ_f 为田间持水量，θ_w 为凋萎湿度。

(3) 标准差和拟合度计算公式：

$$rms=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}$$

$$d_i = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(\left|P_i'\right|^2 - \left|O_i'\right|^2\right)}$$

式中，rms、d_i 分别为标准差和拟合度；P_i，O_i 分别为模拟值和观测值；$P_i' = P_i - O_m$；$O_i' = O_i - O_m$，O_m 为观测平均值；n 为样品个数。

半方差模型

祖元刚，马克明，张喜军：植被空间异质性的分形分析方法 生态学报，1997，17(3)

半方差 $r(h)$ 模型：

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}\left[Z(i) - Z(i+h)\right]^2$$

式中，$Z(i+h)$ 为距 i 点 h 处的依赖变量值；$N(h)$ 为距离为 h 的点对的数量。

有序样方聚类模型

张峰，上官铁梁：有序样方聚类在植被垂直带划分中的应用 植物生态学报，1997，21(3)

(1) 样方组内相异性指标 $D(i,j)$ 模型：

$$D(i,j) = \sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{p}(x_{jk} - \bar{x}_k)'(x_{jk} - \bar{x}_k)$$

(2) 误差函数 $\Delta[f(m,n)]$ 模型：

$$\Delta[f(m,n)] = \sum_{j=1}^{m} D(i_j, i_{j+1} - 1)$$

(3) 最小误差函数 $\Delta[f_0(m,n)]$ 模型：

$$\Delta[f_0(m,n)] = \min\{\Delta[f_0(m-1, j-1)] + D(j,n)\}$$

$$(m < j < n)$$

山区气候的立体性与农林牧的分层模式

王菱：山区气候的立体性与农林牧的分层模式 地理研究，1997，17(4)

(1) 山区温度场方程：

$$T = a_0 + a_1\psi + a_2\lambda + a_3 h + T_g$$

式中，T 为年平均温度；ψ 为地理纬度；λ 为经度；h 为高度；T_g 为地形订正项；a_0 为常数项；a_1、a_2 和 a_3 为偏回归系数。

(2) 自然植被净第一生产力计算公式：

$$NPP_V = 3000\{1 - \exp[-0.000\,969\,5(V - 20)]\}$$

式中，$V = \frac{1.05R}{\sqrt{1 + \left(\frac{1.05R}{E}\right)^2}}$，$E = 300 + 25t + 0.05t^2$，$NPP_V$ 为实际年蒸散量计算得到自然植被净第一性生产力，V 为年实际蒸散量，R 为年平均降水量，E 为年最大蒸散量，t 为年平均温度。

(3) 相应山区苹果种植上限高度计算公式：

$$h = (a_0 - a_1\psi - a_2\lambda - T_g - 7.0)/a_3$$

式中，h 为相应山区苹果种植上限高度。

低效防护林改造的水文效益模型

王兴中：低效防护林改造的水文效益 水土保持通报，1997，17(4)

(1) 年累计植被截持量 I 模型：

$$I = \sum_{i=1, r_i<2}^{n_0} r_i + (n - n_0) \times 2.0 + 0.5r_n$$

式中，n 为观测期内降雨次数；n_0 为观测期内降雨 $r_i < 2.0$mm 的降雨次数；r_n 为非观测期内降雨量合计。

(2) 土壤水分储存：

1) 土壤储存有效水能力 W_e 模型：

$$W_e = W_{min} - P_0$$

式中，W_{min} 为最小持水量；P_0 为萎蔫系数。

2) 年累计土壤获得的总水量 ΔW 模型：

$$\Delta W = r - I - R_g - R_u$$

式中，r 为全年总降水量；I，R_g 和 R_u 分别为年累计植被截持量、地表径流深和渗透径流深。

甜槠林水文学效应模型

李凌浩，林鹏，王其兵等：武夷山甜槠林水文学效应的研究 植物生态学报，1997，21(5)

(1) 甜槠林地作用面的水量分配模型：

$$P_n = \Delta L + \Delta S + R_o + R_S + D + E$$

式中，P_n 为林内净降水；ΔL 为枯枝落叶持水量增量；ΔS 为土壤含水量增量；R_o 为地表径流量；R_S 为地中径流量；D 为土壤渗流量；E 为植物蒸腾、根系吸收与地表面物理蒸发。

(2) 土壤水分入渗性能模型：

$$f_t = f_c + (f_o - f_c)e^{-kt}$$

式中，f_t 为 t 时的入渗率；f_c 为稳渗率；f_0 为初渗率；k 为反映土壤特性的常数。

植被类型分布与土壤类型关系的分析模型

刘卫国、龚建华、方红亮：地理信息系统支持下的知识获取及其在遥感影像植被分类中的应用研究，遥感学报，1998，2(3)

（1）植被类型对土壤类型的隶属函数 $\mu_{ij}(x)$ 模型：

$$\mu_{ij}(x)=\frac{S_{ij}}{\sum_{j=1}^{m}S_{ij}}$$

$$\sum_{j=1}^{m}\mu_{ij}(x)=1$$

$$(i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m)$$

式中，S_{ij} 表示在第 j 种土壤上第 i 类植被的分布数量；n 为植被类型总数；m 为土壤类型总数。

（2）土壤类型对植被的适宜性模型：

$$P(V_a/T_j)=\frac{P(T_j/V_a)P(V_a)}{\sum_{i=1}^{n}P(T_j/V_i)P(V_i)}$$

式中，$P(T_j/V_a)=\mu_{ij}(x)$，$(i=V_a)$ 代表植被类型 V_a 生长于土壤类型 j 条件概率密度；$P(V_a)$ 为第 V_a 种植被类型的先验概率；$P(V_a/T_j)$ 为后验分布概率。

基于 NOAA 时间序列数据分析模型

孙红雨、王长耀等：中国地表植被覆盖变化及其气候因子关系——基于NOAA时间序列数据分析，遥感学报，1998，2(3)

（1）归一化植被指数 $NDVI$ 模型：

$$NDVI=\frac{\rho_{ch2}-\rho_{ch1}}{\rho_{ch2}+\rho_{ch1}}$$

式中，ρ_{ch2}、ρ_{ch1} 分别为第 1，2 波段的反射率。

（2）相关系数 r 模型：

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[(x_i-\bar{X})(y_i-\bar{Y})\right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{X})^2\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{Y})^2}}$$

式中，变量 x 为 $NDVI$；变量 y 为月平均气温或月平均降水量；$\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 分别为变量 x 和 y 的均值；r 为变量 x 与 y 的相关系数；n 为样本量。

（3）偏相关系数模型：

$$r_{12,3}=\frac{r_{12}-r_{13}r_{23}}{\sqrt{(1-r_{13}^2)(1-r_{23}^2)}}$$

式中，$r_{12,3}$ 为将变量 V_3 固定后变量 V_1 与变量 V_2 之间的偏相关系数；r_{12}、r_{13}、r_{23} 分别为变量 V_1 与 V_2、V_1 与 V_3 和 V_2 与 V_3 的相关系数。

典范主分量分析迭代方程

张金屯：典范主分量分析及其在山西植被与气候关系分析中的应用，地理学报，1998，53(3)

$$y_j=b_0+b_1z_{1j}+b_2z_{2j}+\cdots+b_qz_{qj}$$

$$m_k=\sum_{j=1}^{N}x_{kj}y_j \qquad (k=1,2,\cdots,P)$$

$$y'_j=\sum_{k=1}^{P}x_{kj}m_k$$

$$y_j^{*\prime}=\frac{y_j^*}{S}$$

式中，y_j 为第 j 个实体(样方)的排序值；b_0 为截距；b_i 为第 i 个环境因子的回归系数($i=1,2,\cdots,q$，q 为环境因子的数目)；z_{ij} 为第 i 个环境因子值；x_{kj} 为第 k 个种在第 j 个样方中的值；P 为种数；y'_j 计算新的样方排序值；y_j^* 记录值；$y_j^{*\prime}$ 为标准化后的值；

$S=\sum_{j=1}^{N}(y_j^*)^2$，$S$ 为离差。

火炬松单位叶面积的蒸发速度（$E_{C,1}$）

Ewars B E, Oren R, Albaugh T J et al：影响斯泰达河水资源利用中水的径流滞后影响与营养供给，Ecological Applications，1999，9(2)

$$E_{C,1}=\frac{kA_S}{A_L}\left(\frac{n\rho_W\Delta\psi}{l\eta}\right)$$

式中，k 是指水压传导率，n 是茎的数量，ρ_W 是指水的密度，$\Delta\psi$ 是指在土壤与植物之间水的势能梯度，l 是水的势能梯度路径的长度，η 是指水的黏性。

CO_2 和 N 对荷兰沙丘植被的历史模式影响模型

Oene H, Berendse R, Kovel C G F：CO_2 和氮输入的历史水平对植被演替影响的模型分析，Ecological Applications，1999，9(3)

（1）光的截留：

$$I_{abs_{in}} = \frac{k_{ext\,i} I_{lai\,n}}{\sum_i k_{ext\,i} I_{lai\,n}} I_n (1 - \exp[-\sum_i K_{ext\,i} I_{lai\,n}])$$

(2) 潜在同化作用：

$$A_{p\,i} = E_{rui} \sum_n I_{abs\,i\,n} k_i(CO_2) k_i(T)$$

(3) 限水同化作用：

$$A_{w\,i} = \frac{Tr_i}{Tr_{p\,i}} A_{p\,i}$$

(4) 潜在的碳吸收：

$$U_{pot\,i} = \sum_i \left(\frac{L_{sri} B_{ril}}{\sum_i L_{sri} B_{ril}} \right) N_{avail\,l}$$

(5) 还原作用：

$$\frac{dC_{org,c,i,j}}{dt} = -C_{org,c,i,j} k(T)_{dec,i,j} T \cdot \left(\min \left[\frac{\theta_{org}}{\theta_{org,feildcap}}, \frac{\theta_{org,feildcap}}{\theta_{org}} \right] \right)$$

(6) 矿化作用：

$$\frac{dN_{org}}{dt} = \sum_c \sum_i \sum_j \left[\left(\frac{N_{org,c,i,j}}{C_{org,c,i,j}} - n_{crit,c,i,j} \right) \times \left(\frac{dC_{org,c,i,j}}{dt} \right) \left(\frac{1}{1-\varepsilon} \right) \right]$$

式中，$k_{ext,i}$ 是指种 i 的消光系数；$k(T)_{dec,c,i,j}$ 是种的器官 j 与类 j 的相对还原率；$k_i(CO_2)$ 是种 i 同化作用的 CO_2 从属度；$k_{drf,i}$ 是根分布参数；$k_i(T)$ 是种 i 同化作用的温度从属度；$n_{con,max,i}$ 是指种 i 的每单位新生物质量的最大 N 浓度；$n_{con,min,i}$ 是指种 i 的每单位新生物质量的最小 N 浓度；$n_{crit,c,i,j}$ 是类 c 与种 i 的器官 j 的临界 N 浓度；ε 是微生物的同化效率；E_{rui} 是种 i 的潜在辐射利用率；L_{sri} 是种的根长度；$T_{min,i}$ 是种 i 同化作用的最低温度；$T_{opt1,i}$ 是种 i 同化作用的第一个最适宜温度；$T_{opt2,i}$ 是种 i 同化作用的第二个最适宜温度；$T_{max,i}$ 是种 i 同化作用的最高温度；β_i 是指种 i 的 CO_2 增长强度系数；$A_{act,i}$ 是种 i 的实际同化率；$A_{pot,i}$ 是种 i 的潜在同化率；$A_{w,i}$ 是种 i 的限水同化率；$B_{r,i,l}$ 是指在土壤层 l 中种 i 的细根生物量；$C_{org,c,i,j}$ 是指类 c 和种 i 的器官 j 的土壤有机碳，d 是指土壤深度；$I_{abs,i,n}$ 是指在林冠层 n 由种 i 所吸收的辐射；$I_{lai\,n}$ 是指在林冠层 n 中种 i 的叶面积指数；I_n 是指在林冠层 n 的入射辐射；N_{avail_l} 是指在根层 l 中可利用的氮；$n_{con,i}$ 是指种 i 的新生植物物质中氮的浓度；$N_{org,c,i,j}$ 是指类 c 和植物器官 j 及种 i 的土壤有机氮；T 是指空气温度；Tr_i 是指种 i 的实际蒸发作用速度；$Tr_{p,i}$ 是指种 i 的潜在蒸发作用速度；$U_{act,i}$ 是指种 i 的实际氮吸入率；$U_{opt,i}$ 是指种 i 的潜在氮吸入率；Y_i 是指种 i 的累积根物质；θ_{org} 是指土壤有机层中的容积含水量；$\theta_{org,fieldcap}$ 是指农田内土壤有机层中的容积含水量。

植被双向反射模式及其反演模型

温刚：一个植被双向反射模式的反演控制试验 遥感学报，1999，3(3)

(1) 植被双向反射反射率 $r_{vm}(\mu_0)$ 模型：

$$r_{vm}(\mu_0) = \frac{\omega_v}{4\pi} \frac{K}{K+\gamma_v} \times \frac{1-\gamma_v}{a} h_1 [1 - \exp-(K-\gamma_v)L_T] + \frac{\omega_v}{4\pi} \frac{K}{K-\gamma_v} \frac{1+\gamma_v}{a} h_2 \left\{ 1 - \exp\left[-(K-\gamma_v)L_T \right] \right\} + \frac{\omega_v}{4\pi} \frac{K}{K+K_i} \frac{2aK_i}{K_i^2-\gamma_v^2} \left\{ 1 - \exp\left[-(K+K_i)L_T \right] \right\}$$

$$h_1 = -\frac{Ee^{-K_i L_T} + SF}{S-T}$$

$$h_2 = \frac{Ee^{-K_i L_T} + TF}{S-T}$$

$$h_3 = -\frac{aK_i(1+K_i)}{K_i^2-\gamma_v^2}$$

$$h_3 = -\frac{aK_i(1-K_i)}{K_i^2-\gamma_v^2}$$

$$S = \left(\frac{1-a+\gamma_{vG}}{a} - \rho_s \right) e^{\gamma_v L_T}$$

$$T = \left(\frac{1-a-\gamma_v}{a} - \rho_s \right) e^{-\gamma_v L_T}$$

$$E = \rho_s h_3 - h_4$$

$$F = h_3 - (1 - \text{ratio})$$

$$\gamma_v = \sqrt{1-\omega_v}$$

$$a = \frac{\omega_v}{2}$$

$$K_i = \frac{G_i}{\mu_i}$$

$$G_i - \mu_i \mu_l$$

$$K = \frac{1}{\mu_v}$$

式中，$r_{vm}(\mu_0)$为植被冠层多次散射入射植被冠层的漫射太阳辐射的反射率；ω_v为植被叶片的单次散射平均反射率；μ_i为太阳辐射的入射天顶角的余弦；μ_l为叶片法线方向和垂直方向夹角的余弦；μ_v为遥感器观测视角的余弦；1- r_{atio}为太阳辐射通量中太阳漫射辐射通量占有的部分；L_T为植被冠层的总叶面积指数；ρ_s为土壤反射率。

(2) 植被双向反射模式的反演模型：

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{N-p}\sum_{i=1}^{N}(r_i - r')^2}$$

式中，ε为均方根；r_i为第i个实际观测的植被反射率；r'为植被双向反射模式输出的植被反射率；N为每一组的观测样本数目；p为植被双向反射模式待定参数个数。

从AVHRR—GAC数据时间序列中获取烧过面积的算法

Barbosa P M, Grégoire J M, Pereira J M C：一个用于大陆尺度的从AVHRR—GAC数据的时间序列中获取烧过面积的算法. Remote Sensing of Environment, 1999, 69

(1)全球植被监视指数(GEMI)：

$$\mathrm{GEMI} = \eta(1-0.25\eta)-(\rho_1-0.125)/(1-\rho_1)$$

式中，$\eta=(2(\rho_2^2-\rho_1^2)+1.5\rho_2+0.5\rho_1)/(\rho_2+\rho_1+0.5)$，$\rho_1$是AVHRR波段1的大气顶部的反射系数，$\rho_2$是AVHRR波段2的大气顶部的反射系数。

(2) 土壤校正植被指数的第二次修正形式(MSAVI)为：

$$\mathrm{MSAVI} = 0.5\left\{2\rho_2+1)^2-[(2\rho_2+1)^2-8(\rho_2-\rho_1)]^{1/2}\right\}$$

VI3可定义为：

当$\rho_2 > \rho_1$　$\mathrm{VI3} = (\rho_2-\rho_3)/(\rho_2+\rho_3)$

当$\rho_2 < \rho_1$　$\mathrm{VI3} = 0$

式中，ρ_3是AVHRR波段3的大气顶部的反射系数。在某些研究中，为了增强对烧过面积的探测能力，对这些指数进行了专门的修正，即是GEMI的修正形式，此处波段3的反射项代替了波段1：

$$\mathrm{GEMI3} = \eta(1-0.25\eta)-(\rho_3-0.125)/(1-\rho_3)$$

式中，$\eta=\left[2(\rho_2^2-\rho_3^2)+1.5\rho_2+0.5\rho_3\right]/(\rho_2+\rho_3+0.5)$

(3) 表面温度(T_s)可表达为：

$$T_s = B_{T4} + 3.33(B_{T4} - B_{T5})$$

式中，B_{T4}是在AVHRR波段4的真实的亮度温度，而B_{T5}是在AVHRR波段5的真实的亮度温度。

NEWCOP模型

延晓冬等：气候变化背景下小兴安岭天然林的模拟研究. 自然资源学报，1999，14(4)

(1) 最优胸径增长方程：

$$\left[\frac{\mathrm{d}D}{\mathrm{d}t}\right]_{\mathrm{opt}} = \frac{gD(1-DH/D_{\max}H_{\max})}{260+3b_2D-4b_3D^2}$$

式中，$D_{\max}$和$H_{\max}$分别为树种有记载的最大胸径和树高；g为生长参数。胸径(D)-树高(H)关系为$H=130+b_2D-b_3D^2$

(2) 实际胸径增长：

$$\frac{\mathrm{d}D}{\mathrm{d}t} = \left[\frac{\mathrm{d}D}{\mathrm{d}t}\right]_{\mathrm{opt}} \cdot fl(AL)\,ft(ED)\,fd(DD)\,fn(AN)$$

式中，fl，ft，fd和fn分别为光、温、水、肥条件的效应函数。

(3) 树顶现有光(AL)对胸径增长的影响：

$$fl(AL) = a\{1-\exp[-b(AL-c)]\}$$

(4) >5℃有效积温(ED)对胸径增长的影响：

$$ft(ED) = \frac{4(ED-ED_{\min})(ED_{\max}-ED)}{(ED_{\max}-ED_{\min})^2}$$

(5) 生长季干旱天数(DD)份额对胸径增长的影响：

$$fd(DD) = \max\{1-DD/ad, 0\}^{1/2}$$

式中，ad为树种天然分布区内DD的最大值。

(6) 土壤现有养分(AN)对胸径增长的影响：

$$fn(AN) = d + e\cdot AN - f\cdot AN^2$$

式中，a,b,c,d,e和f为与树种耐性等级有关的经验参

数

蒸腾强度 T_t 计算公式

贾志清，孙保平，刘涛等：皇家二岔小流域不同树种蒸腾作用研究 水土保持通报，1999，19(5)

$$T_t = \frac{(a-b)\times 20}{a-c}$$

式中，$a-b$ 为蒸腾耗水量；$a-c$ 为鲜叶重量。

植物光合生产力与冠层蒸散模拟模型

于强，谢贤群，孙菽芬等：植物光合生产力与冠层蒸散模拟研究进展 生态学报，1999，19(5)

(1) 叶片水平的生理过程模拟：

气孔导度 g_{sc} 模型：

$$g_{sc} = g_0 + \frac{a_1 A_n h_s}{C_s}$$

式中，h_s 为叶面相对湿度；A_n 为光合速率；C_s 为 CO_2 浓度；a_1 为系数。

(2) 冠层水平的生理生态模型：

传输导度模型：

$$g_s = g_{s,root}\left(g_{s,min} l_{la} + k_{stoma}\frac{P_s \Omega_g}{C_i}\right)$$

式中，$g_{s,root}$ 为与土壤水分含量有关的经验因子；$g_{s,min}$ 为单叶的最小气孔导度；l_{la} 为叶面积指数；k_{stoma} 为经验参数；P_s 为总光合速率；Ω_g 为无量纲的叶片水热函数。

森林采伐率的计算公式

李双成，杨勤业：中国森林资源动态变化的社会经济学初步分析 地理研究，2000，19(1)

$$D(\%\cdot a^{-1}) = \left[\left(\frac{F_1-F_2}{F_1}\right)/N\right]\times 100$$

式中，D 为年均森林采伐率；F_1 为某一时段起始年份的森林面积；F_2 为某一时段结束年份的森林面积；N 为某一时段的年数。

农田耗水量 ET_c 模型

毛学森，曾江海：硬覆盖对土壤水热传输及作物生长发育影响的试验研究 生态学杂志，2000，19(2)

$$ET_c = E + T = P + I - \Delta W + U - F$$

式中，E 为棵间土壤蒸发量；T 为作物蒸腾量；P 为有效降水量；I 为灌水量；ΔW 为观测时段末、始期土壤含水量；F 为地表径流量；U 为地下水对作物的水分补给量。

土地覆被的气候预测模型

黄玫，李克让，李晓兵等：土地覆被的气候预测模型 地理学报，2000，55(supplement)

神经网络结构的数学式表达为：

$$u_k = \sum_{j=1}^{p}(y_k - V_k)^2/2$$

$$y_k = \varphi(v_k)$$

$$v_k = u_k - \theta_k$$

具体讲，t_m 月的NDVI除了受到当月气温和降水的作用外，还与 $t_{m-1}, t_{m-2}, \cdots, t_{m-n}$ 的NDVI和 $t_{m-1}, t_{m-2}, \cdots, t_{m-n}$ 的降水和温度有关。因此，在建立气候-土地覆被的神经网络模型时，选择能够表征事件序列特征的带外部输入的非线性自回归模型（ARX）框架：

$$y(t) = f[y(t-1),\cdots,y(t-n),u(t-1),\cdots,u(t-m)]$$

式中，$y(t)$ 为网络的输出；$y(t-1),\cdots,y(t-n)$，$u(t-1),\cdots,u(t-m)$ 为网络的输入。$y(t-n)$ 为输出因子 $t-n$ 时刻的值，$u(t-m)$ 为外加输入因子 $t-m$ 时刻的值。

紫花苜蓿根系生长及吸水规律模型

白文明，左强，黄元仿等：乌兰布和沙区紫花苜蓿根系生长及吸水规律的研究 植物生态学报，2001，25(1)

(1) 土壤体积含水量 θ 模型：

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_S - \theta_r}{\left[1+\left(\alpha|h|^n\right)\right]^{1-\frac{1}{n}}}$$

式中，θ_r 为残留含水量；θ_S 为饱和含水量；h 为土壤水基质势；α、n 为拟合参数。

(2) 根系吸水模型：

一维非饱和土壤水分运动的基本方程：

$$C(h)\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K(h)\frac{\partial h}{\partial z}\right] - \frac{\partial K(h)}{\partial z} - S(z,t)$$

式中，h 为土壤水基质势；t 为时间；z 为深度；$C(h)$ 为比水容量；$K(h)$ 为土壤非饱和导水率；$S(z,t)$ 为植物根系吸水速率。

植被所吸收的光和有效辐射比例模型

孙睿，朱启疆：气候变化对中国陆地植被净第一性生产力影响的初步研究．遥感学报，2001，5(1)

$$F_{PAR} = \frac{(VI - VI_{i,\min})(F_{PAR\max} - F_{PAR\min})}{VI_{i,\max} - VI_{i,\min}} + F_{PAR\max}$$

式中，VI 表示比值植被指数，$VI_{i,\max}$和$VI_{i,\min}$ 表示 i 植被类型 F_{PAR} 达到最大值和最小值时的比值植被指数，$F_{FAR\max} = 0.950, F_{PAR\min} = 0.001$。

植被净第一性生产力(NPP)模型

孙睿，朱启疆：气候变化对中国陆地植被净第一性生产力影响的初步研究．遥感学报，2001，5(1)

$$NPP = \varepsilon_g^* f_1(T) f_2(\beta) R_{pa} F_{PAR} - R$$

式中，R 表示呼吸消耗碳元素量 $gm^{-2} \cdot mon^{-1}$，ε_g^* 表示最大光能利用率，$f_1(T)$ 和 $f_2(\beta)$ 分别表示温度和土壤水分对 ε_g^* 的影响，R_{pa} 表示到达地表的光合有效辐射．

FAO 生产潜力模型中基本参数的修正模型

刘建栋，周秀骥，于强：FAO 生产潜力模型中基本参数的修正．自然资源学报，2001，16(3)

1．辐射日变化模拟

(1) 一年中 365 天对应区间 $[0,2\pi]$，取日角 $\theta = 2\pi(d_n - 1)/365$，$d_n$ 为年的日序，1 月 1 日取为 1，12 月 31 日取为 365．那么赤纬 δ 为：

$$\delta = 0.006894 - 0.399512\cos\theta - 0.072075\sin\theta - 0.006799\cos 2\theta + 0.000896\sin 2\theta - 0.002689\cos 3\theta - 0.101516\sin 3\theta$$

(2) 地理纬度为 φ 的地区，日序为 d_n 时，太阳时角 ω 时刻的光合有效辐射 $PAR(\omega)$ 可表示为：

$$PAR(\omega) = \frac{0.5Q\sin h(1 + 0.4\sin h)}{3600Ds}$$

$$Ds = D_L(\sin\varphi\sin\delta + 0.4\sin^2\varphi\sin^2\delta + 0.2\cos^2\varphi\cos^2\delta) + 12\cos\varphi\cos\delta \times \left(2 + 1.2\sin\varphi\sin\delta\pi\sqrt{1 - \frac{\sin^2\varphi\sin^2\delta}{\cos^2\varphi\cos^2\delta}}\right)$$

式中，Q 为总辐射量；h 为太阳高度角；D_L 为日长；由天文辐射公式可知 $\sin h = \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega$；日长 $D_L = 2\omega_0(12/\pi)hr$；$\omega_0 = \arccos(-\tan\varphi\tan\delta)$ 为日落时角，在得到 ω 时刻的总光合有效辐射 $PAR(\omega)$ 后，根据大气传输方程，散射光合有效辐射为 $D^*(\omega) = PAR(\omega) \cdot Df$；

(3) Df 为散射辐射所占比例：

$$Df = \begin{cases} 1 & (a_t \leqslant 0.22) \\ 1 - 6.4(a_t - 0.22)^2 & (0.22 < a_t \leqslant 0.35) \\ 1.47 - 1.66a_t & (a_t > 0.35) \end{cases}$$

式中，$a_t = \frac{PAR(\omega)}{0.5Sc\sin h}$；$Sc$ 为太阳常数，其值随日序而变化，可表示为 $Sc = 1370[1 + 0.033\cos(2\pi)]$。

(4) 直接光合有效辐射为：

$$S^*(\omega) = PAR(\omega) - D^*(\omega)$$

2．冠层光合生产力模型

(1) 冠层光分布模式：

在太阳光线 n_s 方向上 G 函数可表示为：

$$G(n_s) = G(h, A) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} d\Phi_L \int_0^{\pi/2} g(\theta_L, \Phi_L)|\cos n_s n_L|\sin\theta_L d\theta_L$$

式中，h 为太阳高度角；A 为太阳方位角；$g(\theta_L, \Phi_L)$ 为叶方位角 Φ_L、叶倾角为 θ_L 的叶倾角分布函数；n_L 为叶片法线方向的单位矢量；$\cos n_s n_L$ 为太阳光线方向和叶片法线方向夹角的余弦，可表示为 $\cos n_s n_L = \sin h\cos\theta_L + \cos h\sin\theta_L\cos(A - \Phi)$

直射光穿透函数 $\tau_s(L, n_s)$ 和散射光穿透函数 $\tau_s(L)$ 为：

$$\tau_s(L, n_s) = \exp - L \cdot \frac{G(n_s)}{\sin h}$$

$$\tau_d(L) = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2} \tau_s(L, n)\cos\theta\sin\theta\, d\theta \cdot d\Phi$$

式中，$\tau_s(L, n)$ 为倾角 θ 和方位角 Φ 所决定矢量方向的透过函数；$\frac{G(n_s)}{\sin h}$ 即是消耗光系数 K。

当太阳高度角为 h，方位角为 A 时，叶面积深度 L 处水平直接光合有效辐射为 $S^*(L, n_s) = S^*(\omega)\tau_s(L, n_s)$，那么，叶面积深度 L-1~L 层次内、倾角为 θ_L、方位角为 Φ_L 叶片上的直接光合有效辐射为：

$$S^*(L - 1, \theta_L, \varphi_L) = \frac{S^*(L - 1, n_s)}{\sin h} \cdot |\cos n_s n_L|$$

在太阳高度角 h，方位角为 A 时，考虑了一次散射过程后的叶面积深度 L 处水平散射光合有效辐射强

度为：

$$D^*(L)=D^*(\omega)\tau_d+\frac{Q^*(\omega)\sigma^*K(e^{-KL}-e^{-L})}{1-K}$$

式中，$\sigma^*=(\rho^*+\tau^*)/2$，$\rho^*$为叶片光合有效辐射反射系数，$\tau^*$为叶片光合有效辐射透射系数，在叶面深度$L$-1~$L$层次内、倾角为$\theta_L$、方位角为$\Phi_L$的叶片接收到的散射辐射量与叶方位角无关，可以表达为$D^*(L-1\sim L,\theta_L,\Phi_L)=D^*(L-1)\cdot\frac{1+\cos\theta_L}{2}$。

(2) 作物叶片光合作用模式：

水分及管理措施适宜状况下的作物叶片光合作用模式可以表示为：

$$\begin{cases} P_n=\dfrac{\alpha I+\beta C-\sqrt{(\alpha I-\beta C)^2-4\theta(\alpha I\cdot\beta C)}}{2\theta}\times \\ \qquad \dfrac{2(T+B)^2(T_{max}+B)^2-(T+B)^4}{(T_{max}+B)^2}-R_d \\ R_d=R_m+R_s \\ R_m=r_m\cdot DM\cdot Q_{10}^{\frac{T-T_m}{10}} \\ R_s=(1-\text{CVF})(P_z-R_m) \end{cases}$$

式中，P_n为净光合速率；α为初始光合速率；I为光合有效辐射光量子通量密度；θ为凸度；T为温度；B为温度订正函数中的温度影响廓线参数；R_d为暗呼吸速率；R_m为维持呼吸速率；R_s为生长呼吸速率；r_m为维持呼吸系数；DM为干物；CVF为初始光合产物的转换效率，CVF和Q_{10}是生化参数，一般生化参数随作物品种变化很小，取$Q_{10}=2.0$，CVF = 0.7。

(3) CO_2日总同化量：

将太阳高度角ω时刻，叶面积温度L、倾角为θ_L、方位角为Φ_L叶片上的光合有效辐射$Q^*(\omega,L,\theta_L,\Phi_L)$代入单叶光合作用模式中得到此叶片净光合作用速率$P_j(\omega,L,\theta_L,\Phi_L)$，那么对时角$\omega$时进行积分，得到$CO_2$日总同化量为

$$P_z(\omega)=\int_{-\omega_0}^{-\omega_0'}\int_0^L\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2}[P_j(\omega,L,\theta_L,\Phi_L)\times P(L,\theta_L,\Phi_L)d\theta]d\Phi_L dLd\omega_L$$

式中，$-\omega_0'$，$-\omega_0$分别为日出时角和次日出时角；$P(L,\theta_L,\Phi_L)$为叶面积深度L处、倾角为θ_L、方位角为Φ_L的叶面积密度值，为保证计算精度，对叶面积深度进行逐层积分，叶倾角、方位角分别划分为6个区域和8个区域进行积分，可表达为：$P_z(\omega)=\sum_{L=1}^{INT(LAI)+1}\sum_{i=1}^{6}\sum_{j=1}^{8}P_j(\omega,L,\theta_L i,\Phi_L j)\,P(L,\theta_L i,\Phi_L j)\Delta\theta_L i\Delta\Phi_L j\Delta L$，对$\omega$进行连续积分，可求出$CO_2$日净同化量的精确解，模型中设定作物为零级呼吸速率，则是CO_2日总同化量。

荫蔽度模型

王正文，王德利，臧传来等：大兴安岭次生林白桦对林下日阴菅及其他主要草本植物的影响　生态学报，2001，21(8)

$$DS=\frac{\pi}{300}\sum_{i=1}^{n}B_i^2(H_i-L_i)$$

式中，B_i为样方中第i株白桦的冠幅；H_i为第i株白桦的树高；L_i为第i株白桦的的下枝高；n为样方中白桦的个体数。

第 三 篇

人文地理学



第十二章 工业地理

工业布局与宏观环境模型

Matsuda I, Ishikawa M, Kaya Y：工业布局模型中的环境宏观研究. Ecological Modelling, 1981,12

(1) 环境无伸缩性指数：

估算的第 i 地区的环境无伸缩性指数 $\hat{\phi}_i$ 被定义为第 i 地区的生境中的一个环境无伸缩性的加权平均数

$$\hat{\phi}_i = \sum_{k=1}^{i_k} S_{ik}\hat{\phi}_{ik} / S_i$$

式中，i_k 是第 i 地区样本生境的数量；S_{ik} 是第 i 地区的第 k 样本生境的面积；$S_i = \sum_{k=1}^{i_k} S_{ik}$；$\hat{\phi}_{ik}$ 是第 i 地区的第 k 样本生境中被估算的环境无伸缩性。

(2) 环境无伸缩性指数的统计特性：

环境无伸缩性指数的变化被表示为：

$$Var(\hat{\phi}_i - \phi_i) = \sum_{k=1}^{i_k} S_{ik}^2 Var[\hat{\phi}_{ik} - \phi_{ik}] / S_i^2 + 2\sum_{k<m}^{i_k} S_{ik}S_{im}E[(\hat{\phi}_{ik} - \phi_{ik})(\hat{\phi}_{im} - \phi_{im})] / S_i^2$$

式中，ϕ_{ik} 是 $\hat{\phi}_{ik}$ 的期望值；ϕ_i 是 $\hat{\phi}_i$ 的期望值。

因为不同的样本相互独立，$\hat{\phi}_{ik}$ 和 $\hat{\phi}_{im}$ 的协同变化可被近似表示为：

$$E[(\hat{\phi}_i - \phi_i)(\hat{\phi}_j - \phi_j)] - \sum\sum S_{ik}S_{jm}E[(\hat{\phi}_{ik} - \phi_{ik})(\hat{\phi}_{im} - \phi_{im})] / S_iS_j$$

同样，ϕ_i 和 ϕ_j 的协同变化如下：

$$E[(\hat{\phi}_i - \phi_i)(\hat{\phi}_j - \phi_j)] = \sum_{k=1}^{i_k}\sum_{m=1}^{j_m} S_{ik}S_{jm}E[(\hat{\phi}_{ik} - \phi_{ik})(\hat{\phi}_{im} - \phi_{im})] / S_i\ S_j$$

假设被估算的环境无伸缩性的概率分布近似于正态分布，ϕ_i 的 $100\gamma\%$ 的置信区间在以 $\hat{\phi}_i$ 为中心的如下区间中：

$$\hat{\phi}_i \pm z_\gamma \left[Var(\hat{\phi}_i - \phi_i)\right]^{1/2}$$

式中，z_γ 满足 $\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-z_\gamma}^{z_\gamma} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right)dz = \gamma$。

(3) 一个地区的平均每年污染水平能被粗略地估算为每单位面积上硫释放的数量乘以相应地区的环境无伸缩性指数。每个地区平均每年污染水平的估算值 T_i 被表示为：

$$T_i = \sum_{k=1}^{M} e_k v_{ik}\hat{\phi}_i / S_i$$

式中，e_k 是第 k 部门中生产每单位产品所释放的污染物的数量；v_{ik} 是第 i 地区第 k 部门增加的产值；M 是工业部门的数量。

标准 f_2 被表示为：

$$f_2 = \sum_{i=1}^{N} |T_i - T| S_i / \hat{\phi}_i$$

式中，T 是 T_i 对于 i 的平均值；N 是模型中地区的数量。

我国工业布局的变化趋势分析公式

胡兆量：我国工业布局的变化趋势. 地理学报，1986, 41(3)

(1) 地理联系率：

$$G = 100 - \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} |F_i - S_i|$$

式中，G 为地理联系率；F 为各地区工业总产值占全国的百分比；S 为各地区人口占全国的百分比。

(2) 集中指数：

$$C = 100 - \frac{H}{T} \times 100$$

式中，C 为集中指数；T 为全国人口；H 为集中该要素一半的区域人口。

总运费最小的物资调运数学模式

朱德威，梁进社：大宗物质供销区位的定量分析及其引伸. 地理学报，1986, 41(4)

$$\min \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} c_{ij}x_{ij}$$

式中，x_{ij} 是从第 i 个产地运往第 j 个销地的货物量；c_j 是已知的从 A_i 运输单位货物到 B_j 的运费；$A_1,A_2,\cdots,A_m$ 为某大宗物资(如粮食、煤炭、原油)产地，其产量分别为 $a_1,a_2,\cdots,a_m$；$B_1,B_2,\cdots,B_n$ 为销地，销量分别为 $b_1,b_2,\cdots,b_n$

约束条件为：

$$-\sum_{j=1}^{n}x_{ij}=-a_i \qquad (i=1,2,\cdots,m)$$

$$\sum_{i=1}^{m}x_{ij}=b_j \qquad (j=1,2,\cdots,n)$$

$$x_{ij}\geqslant 0 \qquad (i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n)$$

$$\sum_{i=1}^{m}a_i=\sum_{j=1}^{n}b_j$$

工业成组布局经济效果及最佳规模优化模型

沈小平：试论工业区工业企业成组布局的经济效果和最佳规模的确定．地理学报，1987，42(1)

$$\min\left(\sum_{\tau=1}^{T}\sum_{i=1}^{n}\frac{F_jX_{i\tau}}{R}a_1+\sum_{\tau=1}^{T}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\frac{F_{ij}Y_{i\tau}^{j}}{R}a_2\right)$$

$$a_1=I_{xi}\cdot\sum_{t=t_1}^{t_{bi}-1}r_{it}(1+r_0)^{t_{bi}-t}+U_{xi}\sum_{t=t_{ai}}^{t_{bi}}R_{it}(1+r_0)^{t_{bi}-t}+U_{xi}\cdot R$$

$$a_2=I_{yij}\sum_{t=t_1}^{t_{bi}-1}r_{it}(1+r_0)^{t_{bi}-t}+U_{yij}\sum_{t=t_{ai}}^{t_{bi}}R_{it}(1+r_0)^{t_{bi}-t}+U_{yij}\cdot R$$

式中，R 为定额序列现值因子；$F_j=\dfrac{A_1F_j^1+A_2F_j^2}{A_1+A_2}$ 为地区布局系数，F_j^1 为第 j 个地区的国防安全系数，F_j^2 为地区的照顾系数，A_1 和 A_2 为权数；F_{ij} 为第 i 个基本企业的第 j 个对照企业所在地区的布局系数；n 为基本企业数；$X_{i\tau}$ 为第 i 个基本企业 τ 时段的新增产能；m 为对照企业数；$Y_{i\tau}^{j}$ 为第 i 个基本企业的第 j 个对照企业 τ 时段的新增产能；I_{xi} 为第 i 个基本企业单位生产能力的投资额；I_{yij} 为第 i 个基本企业的第 j 个对照企业单位生产能力的投资额；U_{xi} 为第 i 个基本企业单位产品的年运营费；U_{yij} 为第 i 个基本企业的第 j 个对照企业单位产品的年运营费；t_{bi} 为第 i 个基本企业与其相对应的对照企业施工结束或工程效益达到设计规模的年份；r_{it} 为第 i 个基本企业与对照企业施工期各年投资分配系数；$t_{ai}-t_{bi}$ 为第 i 个基本企业与对照企业的试运行期；R_{it} 为第 i 个基本企业与对照企业的试运行期运营费相当于正常生产运营费的百分比；r_0 为投资回收率(或利率)；L_{xi} 为第 i 个基本企业与对照企业生产规模的经济合理下限；g_{xi} 为第 i 个基本企业与对照企业生产规模的经济合理上限；C_τ 为 τ 时期工业区对个运输的最大能力；C_{xi} 为第 i 个基本企业生产单位产品的货运量；$C_{0\tau}$ 为 τ 时期工业区其他企业及生活用品货运量；W_τ 为 τ 时期工业区最大的供水能力；W_{xi} 为第 i 个基本企业生产单位产品耗水量；$W_{0\tau}$ 为 τ 时期工业区其他企业及市政生活用水量；D_τ 为 τ 时期不引起地价和拆迁费大幅度上涨的工业区最大占地面积；D_{xi} 为第 i 个基本企业单位产能占地面积；$D_{0\tau}$ 为 τ 时期工业区其他企业及居住区占地面积；E_τ 为 τ 时期工业区供电能力；E_{xi} 为第 i 个基本企业生产单位产品的耗电量；$E_{0\tau}$ 为 τ 时期工业区其他企业及生活、第三产业等用电量；$G_{xyi\tau}$ 为第 i 个基本企业与对照企业的产品在 τ 时期的最大需求量；X_{i0} 和 Y_{j0} 为第 i 个基本企业和相应的对照企业现有的生产能力。

模型的基本约束条件为：

$$L_{xi}\leqslant\sum_{\tau=0}^{T}Y_{i\tau}^{j}\leqslant g_{xi}$$

$$L_{xi}\leqslant\sum_{\tau=0}^{T}X_{i\tau}\leqslant g_{xi}$$

$$\sum_{\tau=0}^{T}X_{i\tau}+\sum_{\tau=0}^{T}\sum_{j=1}^{m}Y_{i\tau}^{j}\leqslant G_{xyi\tau}$$

$$\sum_{\tau=0}^{T}\sum_{i=1}^{n}C_{xi}X_{i\tau}+C_{o\tau}\leqslant C_\tau$$

$$\sum_{\tau=0}^{T}\sum_{i=1}^{n}W_{xi}X_{i\tau}+W_{o\tau}\leqslant W_\tau$$

$$\sum_{\tau=0}^{T}\sum_{i=1}^{n}D_{xi}X_{i\tau}+D_{o\tau}\leqslant D_\tau$$

$$\sum_{\tau=0}^{T}\sum_{i=1}^{n}E_{xi}X_{i\tau}+E_{o\tau}\leqslant E_\tau$$

$$X_{i\tau}\geqslant 0 \quad (i=1,2,3,\cdots,n)$$

$$Y_{i\tau}^{j}\geqslant 0 \quad (j=1,2,\cdots,m)$$

综合体的控制模型

樊杰：长治—焦作地域工业综合体的组织．地理学报，1989，44(2)

$$X = AX + x = \left[a_{ij}\right]_{7\times 7} \times \begin{vmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_7^* \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_7^* \end{vmatrix}$$

式中，系统矩阵 $A=\left[a_{ij}\right]_{7\times 7}$ 控制模型的基础表；X_i（$i=1,2,\cdots,7$）分别代表上表各项的规模值；x_i（$i=1,2,\cdots,7$）分别代表向区外输出或剩余、积累部分；X_7，x_7 为相应的全区工农业总产值项；$X_{煤}$、$X_{电}$、…、$X_{农}$ 分别代表煤炭、电力工业、…、农业产值；$X_7'=X_7-(X_{煤}+X_{冶}+X_{建})$；$X_7''=X_7-X_{农}$；$X_7'''=X_7-X_{煤}$；$X_7^*$ 和 x_7^* 为第七项的一般表示符。

一致性指标模型

梁吉义：陕西矿产资源合理开发层次分析研究．自然资源，1989，3

$$CI=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1}$$

式中，λ_{max} 为评判矩阵特征根最大值；当评判矩阵完全一致时，$CI=0$；CI 愈大，矩阵的一致性愈差。

农村能源需求预测模型

薛全鼎，朱光远，高增义：豫南丘陵山区农村能源需求远期预测及解决途径．自然资源学报，1989，4(4)

(1) 生活用能预测：

农村生活用能需求预测采用人均能量法，涉及人口、人口自然增长率及年人均基本生活能耗等。采用计算公式：

$$E_{1t}=E_{10}(1+a)^{t-t_0}$$

式中，E_{1t} 为第 t 年度农村生活用能需求量；E_{10} 为基期年度农村生活用能量；t 为规划年度；t_0 为基期年度；a 为 t_0 到 t 年间农村生活能耗平均增长率。

若考虑人口增长因素，公式为：

$$P_t=P_0(1+\theta)^{t-t_0}$$

式中，P_t 为第 t 年度农村人口总数；P_0 为基期年度农村人口总数；θ 为 t_0 到 t 年间农村人口平均自然增长率。

(2) 生产用能预测：

生产用能考虑农业生产、农村工业、农村建筑业、运输业以及商业饮食业五个部门，涉及农村各项产品产量、产值及单位能耗。全区农村生产用能预测采用下式计算：

$$E_{2t}=E_{20}(1+b)^{t-t_0}$$

式中，E_{2t} 为第 t 年度农村生产用能需求量；E_{20} 为基期年度农村生产用能量；t 为规划年度；t_0 为基期年度；b 为 t_0 到 t 年间农村生产能耗平均增长率

区域发展规划中的系统动力学模型

刘小金，毛汉英，陈为民等：系统动力学在区域发展规划中的应用．地理学报，1991，46(2)

(1) 工业固定资产形成方程：

$$IFI.K(I_{20})=FI.K(I_{20})\cdot IFDR.K(I_{20})$$

$$IFAN.KL(I_{20})=DELAY_3\left[IFI.K(I_{20}),IDEL(I_{20})\right]$$

$$IFA.K(I_{20})=IFA.J(I_{20})+DT\cdot\left[IFAN.JK(I_{20})-IFAD.JK(I_{20})\right]$$

$$IFAD.KL(I_{20})=IFA.K(I_{20})\cdot IDR.K(I_{20})$$

式中，$DELAY_3$ 为行业当年新增固定资产；$I_{20}=I_{21},I_{22},I_{23},\cdots,I_{31},I_{32},I_{33}$ 表示工业的12个组合行业；$IFAD.JK(I_{20})$ 为工业分行业固定资产折旧；$IDR.K(I_{20})$ 为工业12个行业的固定资产折旧率。

(2) 工业分行业总产值方程：

$$IGP.K(I_{20})=C_0.K(I_{20})+C_1.K(I_{20})\cdot IFA.K(I_{20})+C_2.K(I_{20})\cdot ILI.K(I)+C_3.K(I_{20})$$

式中，$IFA.K(I_{20})$ 为行业当年实际可使用的固定资产原值；$ILI.K(I_{20})$ 为当年投入的劳动力数；C_0、C_1 和 C_2 为统计回归系数；C_3 为模型残差修正项。

(3) 有关约束条件方程：

$$IDW.K(I_{20})=IGP.K(I_{20})\cdot IWEERK(I_{20})$$

$$ISW.K(I_{20})=SW.K(I_{20})\cdot IWDRK(I_{20})$$

$$ILW.K(I_{20})=IDW.K(I_{20})-ISW.K(I_{20})$$

式中，IDW 为行业需水量；ISW 为行业供水量；ILW 为行业用水缺口。

陆地再生能源资源的计算模型

陈洪经，冯惠琳：试论我国陆地再生能源资源及其特征．自然资源学报，1991，6(2)

(1) 太阳能资源的计算。单站太阳能年总量的公式如下：

$$Q=Q_0(0.29+0.557S_1)$$

式中，Q 为计算太阳能总辐射量；Q_0 为晴天太阳总辐射能量；S_1 为日照百分率。

（2）风能资源的计算。平均有效风能密度可以表示为：

$$\overline{W}=\frac{1}{T}\int_0^T\frac{1}{2}\rho V^3\mathrm{d}t$$

式中，$\overline{W}$ 为平均有效风能密度；V 为相应时刻的有效风速；T 为年总有效风速时间；ρ 为空气密度。有效风速范围采用距地面高度 10m，风速 3~20m·s^{-1}。

单机年生产风能量的计算：

$$Q=\overline{N}TK=\frac{1}{2}\rho V^3FKT=\overline{W}FKT=\frac{\pi}{4}\overline{W}D^2KT$$

式中，Q 为单机年生产风能量；$\overline{N}$ 为风力发动机轴功率；T 为年有效风速小时数；$\overline{W}$ 为平均有效风能密度；F 为风轮叶片的回转面积；D 为风轮直径；$K=K_1\cdot K_2\cdot K_3$，K_1 为风能利用系数，K_2 为平均风机效率，K_3 为平均电机效率。

风机阵列：

$$M=\frac{5100}{D^2}$$

式中，M 为 1 km^2 可装置的风力发动机台数；D 为风轮直径。

模糊综合评价模型

陈龙桂，李万亨：广西矿产资源开发顺序综合评价研究．自然资源，1991，6

$$B=AR$$

式中，B 为每个矿种的综合评价结果；A 为评价因素或指标的权重集；R 总评价矩阵。

澳大利亚制造业变化分析公式

李小建：论工业变化的综合研究．地理学报，1991，46(3)

（1）澳大利亚制造业结构变化指数：

$$\theta=\arccos\left\{\frac{\sum_i S_i(t)S_i(t-1)}{\sqrt{\left[\sum_i S_i^2(t)\right]\left[\sum_i S_i^2(t-1)\right]}}\right\}$$

式中，θ 为结构变化；$S_i(t-1)$ 和 $S_i(t)$ 分别为制造业部门 i 在 $t-1$ 年和 t 年在制造业总体中所占的比例。

（2）澳大利亚制造业专业化指数：

$$S_pI=\left(1+\frac{\sum_i S_i\cdot\ln S_i}{\ln n}\right)\times100$$

式中，S_pI 为专业化两个指数；S_i 为制造业中部门 i 在制造业总体中所占比例；n 为制造业内部部门数

（3）制造业区域变化分析：

$$NS=E^t-E(N^t/N)$$

$$IMS=e(n^t/n-N^t/N)$$

$$MIMS=e^t-e^t\cdot\left(n/n^t\right)\left(N^t/N\right)$$

$$IMMS=MIMS-IMS$$

$$CS=NS-IMS-IMMS$$

式中，NS 为相对净移动；IMS 为结构移动值；$MIMS$ 为修正结构移动值；$IMMS$ 为部门结构修正移动值；CS 为竞争移动值；e, e^t 分别为某区内某制造业部门在研究时段初、终的就业人数；E, E^t 分别为某区内所有制造业部门在研究时段初、终的就业人数；n, n^t 分别为所有区域某制造业部门在研究时段初、终的就业人数；N, N^t 分别为所有区域所有制造业部门在研究时段初、终的就业人数。

工业布点的最优区位值计算公式

梁仁彩：论工业区的地域结构与地域类型．地理研究，1993，12(2)

$$V_{\max}=R_{\min}=\sum_{i=1}^{n}R_i\cdot\exp(-\overline{p})$$

式中，$V_{\max}$ 为最优区位值；R_i 为工业地域的运动方向阻力值；$\overline{P}=\sum_{i=1}^{n}E_{ij}$，$\overline{P}$ 为地域经济规模潜能平均指数，E_{ij} 为工业地域综合体相互渗透值。

油田开发区水体的非点源石油污染测算公式

熊运实：油田开发区水体的非点源石油污染试验研究——以胜利油田为例．地理研究，1993，12(4)

（1）样品含油量分析：

$$Q=\frac{m\cdot V_1\cdot n}{V_2}$$

式中，Q 为样品中的含油量 m 为样品质量；V_1 为萃取中消耗的石油醚体积；V_2 为萃取后样品的体积；n 为稀释倍数。

（2）非点污染源的油类侵蚀量计算公式：

$$Y_d = 0.01C_dQ_dA_d$$

式中，Y_d 为非点污染源 d 的油类侵蚀量($t\cdot a^{-1}$)；C_d 为非点污染源 d 的单位污染负荷；Q_d 为非点污染源 d 的年径流深；A_d 为非点污染源 d 的分布面积。

$$q_{id} = \begin{cases} (P_i - 0.2S)^2 / (P_i + 0.85S) & (P > 0.2S) \\ 0 & (P \leqslant 0.2S) \end{cases}$$

$$Q_d = \sum_{i=1}^{365} q_{id}$$

$$S = 2541/CN - 25.4$$

式中，q_{id} 为非点污染源 d 的第 i 日径流深；P_i 为非点污染源 d 的第 i 日降水量；S 为滞留系数；CN 为自然因子的函数

行业空间配置的线性对偶模式

梁进社：行业空间配置的线性对偶模式。地理学报，1994，49(2)

$$G = \min_{x_{ij}^h, y_i, z_{ij}^h} \left[\sum_{h=1}^{k}\sum_{i=1}^{lh}\sum_{j=1}^{m}\left(f_i^h + t_{ij}^h\right)x_{ij}^h + \sum c_i y_i + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} t_{ij} z_{ij} \right]$$

式中，$x_{ij}^k, y_i, z_{ij} \geqslant 0$；$k$ 为生产需要原料的种数；$b_1^h, b_2^h, \cdots, b_{lh}^h$ 分别为第 h 种原料的产地 $M_1^h, M_2^h, \ldots, M_{lh}^h$ 的最大供应量；$f_1^h, f_2^h, \cdots, f_{lh}^h$ $(h = 1, 2, \cdots, k)$ 为与这些产地相对应的单位原料的生产成本；n 为这种行业之产品消费地的个数；$q_1, q_2, \cdots, q_n$ 为 $S_1, S_2, \cdots, S_n$ 的需要量；$R_1, R_2, \cdots, R_m$ 为可以生产这种产品的 m 个地点；$c_1, c_2, \cdots, c_m$ 为与之相应的单位产品的加工成本；r_h 为生产单位产品所需第 h 种原料的投入；t_{ij}^h 为原料 h 从第 i 个产地 M_i^h 到第 j 个成品加工地 R_j 的运输费用；t_{ij} 为从第 i 个产地到第 j 个产品消费地的单位产品的运输费；y_i 为第 i 个产地 R_i 的生产量；x_{ij}^h 为原料 h 从第 i 个产地 M_i^h 到第 j 个成品加工地 R_j 的运输量；z_{ij} 为第 i 个消费地对第 j 个生产地的调运量。

其约束条件是：

原料 h 的运输量不能超过其产地的供应量，即：

$$\sum_{j=1}^{m} x_{ij}^h \leqslant b_i^h$$

原料 h 的运输量应满足各生产地的需要量，即：

$$\sum_{i=1}^{lh} x_{ij}^h \leqslant r_h y_j$$

每个产品生产地调出量应不超过其生产量，即：

$$\sum_{j=1}^{n} z_{ij} \leqslant y_i$$

每个消费地的需求必须得到满足，即：

$$\sum_{i=1}^{m} z_{ij} \geqslant q_j$$

每一种资源的供应量必须能够满足其需要量，即：

$$\sum_{i=1}^{lh} b_i^h \geqslant r_k \sum_{j=1}^{n} q_j$$

上述线性规划的空间配置对偶为：

$$\max_{u,v,w,p}(-b, 0, 0, q)\begin{bmatrix} u^{\mathrm{T}} \\ v^{\mathrm{T}} \\ w^{\mathrm{T}} \\ p^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} = \max_{u,v,w,p}\left(-bu^{\mathrm{T}} + qp^{\mathrm{T}}\right)$$

约束条件为：

$$(u, v, w, p)\begin{bmatrix} -A & 0 & 0 \\ B & -r & 0 \\ 0 & I & -D \\ 0 & 0 & E \end{bmatrix} \leqslant \begin{bmatrix} T_k^{\mathrm{T}} \\ c^{\mathrm{T}} \\ T^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}$$

式中，u 原料产地从原料所得的利润；v 为原料在产品生产地的销价；w 为产品在产地的出厂价格；p 为产品在销地的销价。

石油开发生态环境影响评价模型

穆从如：石油开发对黄土高原地区生态环境的影响研究，地理研究，1994，13(4)

(1) 非点污染石油侵蚀量计算公式：

$$Y_1 = C_b Q_b A_1$$

式中，Y_1 为非点污染源油侵蚀量；C_b 为单位面积石油负荷；Q_b 为年平均径流深；A_1 为非点污染源产生面积。

(2) 土壤含油量计算公式：

$$C_n = C_B + (C_{n-1} - C_B)K + Y$$

式中，C_n 为 n 年土壤表层油含量；C_B 为土壤油背景值；K 为土壤矿物油衰减率；Y 为 n 年污染物排放量。

(3) 坡地井所占土地面积计算公式：

$$h=\frac{2\alpha^2}{\cos\beta}$$

式中，h 为各种坡地单井井台占用土地；α 为井台设计边长；β 为井场用地地面坡度

(4) 生态环境综合评价值：

$$B=\sum_{i=1}^{n}\frac{C_i}{G_i}K_i$$

式中，B 为生态环境综合评价值；C_i 为 i 项生态因子指标值；G_i 为 i 项生态最佳值；K_i 为项生态因子权系数

沱江地区风能的估算模型

吴礼庆、杨丽英、崔新成等：沱江地区风能资源分析及发电应用研究．自然资源，1996，1

(1) 风能公式：

$$W=\frac{1}{2}\rho V^3F$$

式中，W 为风能；ρ 为空气密度；V 为气流速度；F 为气流垂直流过截面积的假想面。

(2) 风能密度模型：

$$w_*=\frac{1}{2}\rho V^3$$

式中，w_* 为风功率密度。

(3) 平均风能密度 $\overline{w}_*$ 模型：

$$\overline{w_*}=\frac{\sum\frac{1}{2}N_i\rho V_i^3}{N}\qquad(i=1,2,3,\cdots)$$

式中，N_i 为相应等级风速 V_i 的出现次数；N 为总次数

区际商品率指数

欧阳南江：珠江三角洲工业地域分工研究．地理学报，1996，51(1)

$$R_q=M_i-P_i\cdot k$$

式中，R_q 为区际商品率指数；M_i 为某县(市)第 i 个工业部门产值占全区该部门产值的比重；P_i 为某县(市)总人口占全区总人口比重；k 为系数。

区域矿产资源承载能力分析模型

徐强：区域矿产资源承载能力分析几个问题的探讨．自然资源学报，1996，11(2)

1. 矿产资源人口承载能力分析模型

各项分析指标的含义及其计算如下：

(1) 预测的人均正常消耗量(R_Z)：

$$R_Z=R_C\frac{1-\rho}{K_K\varepsilon\gamma}$$

式中，R_C 为人均矿产资源消耗量；K_K 为经济可开采储量系数；ρ 为矿石贫化率；ε 为采矿回收率；γ 为选冶综合产率。

(2) 预测的人口数量(R)：指根据本区域人口自然增长率及其变化趋势，对未来时期人口进行预测得到的结果。

(3) 预期需求(X)：根据上面两项指标计算得到未来时期的需求总量。它实际反映的是经济发展和人口增长对矿产资源量的需求。计算公式如下：

$$X=R_ZR$$

(4) 预期储量(S)：根据矿产资源储量增长率和新增采选能力，按20年的储量储备时间平均计算得到未来时期年可动用的矿产储量。这实际上应是经济和人口增长所必须首先考虑的基本情况之一。

(5) 供需平衡(P_1)：指预期储量和预期需求之间的差值。这是矿产资源人口承载能力分析的主要指标之一，它反映了未来人口增长条件下矿产资源的不足或富余。计算公式为：

$$P_1=S-X$$

(6) 预期储量承载人口(N)：根据预期储量和预期的人均消耗量计算得到的商。这是矿产资源人口承载能力分析最重要的一个指标，它反映了矿产资源未来能供养的人口数量极限。计算公式为：

$$N=SR_Z$$

(7) 预期储量人均占有量(Z)：根据预期储量和预期的人口数量计算得到的商。它表明矿产资源对人口发展的支持和区域资源实力。计算公式为：

$$Z=SR$$

(8) 人均消耗平衡预测(P_2)：是预期人均占有量和预测的人均消耗量之间的差值。这是矿产资源的人口承载能力的主要指标之一，它反映了在保证正常物质生活水平下，人均资源的不足或富余。计算公式为：

$$P_2=Z-R_Z$$

2. 矿产资源经济承载能力分析模型

各项分析指标的含义及其计算如下：

(1) 预期国民生产总值总量(G)：指根据规划的经济发展速度计算的未来n年内国民生产总值总量。也可以用国民收入代替国民生产总值。计算公式为：

$$G=G_0\frac{(1+d)^{n+1}-(1+d)}{d}$$

式中，G_0为基年的国民生产总值(或国民收入)；d为国民生产总值(或国民收入)的增长速度。

(2) 矿产资源探明储量消耗系数(K_Z)：指单位国民生产总值(或国民收入)所消耗的矿产资源探明储量，此指标可根据单位国民生产总值(或国民收入)矿产品消耗统计量计算得到。计算公式为：

$$K_Z=K_C\frac{1-\rho}{K_K\varepsilon\gamma}$$

式中，K_C为单位矿产品的消耗系数。

(3) 矿产资源探明储量消耗总量(A)：指在规划的经济发展速度下，未来n年内矿产资源探明储量消耗总量。它是在一定经济发展速度下，经济对矿产资源的要求。计算公式为：

$$A=K_ZG$$

(4) 矿产资源(探明储量)预测总量(Y)：指根据矿产资源勘察状况预测的未来n年内所能提供的矿产资源(探明储量)总量。

(5) 矿产资源支持能力(C)：指现有或预测矿产资源(探明储量)所能支持的最大国民生产总值(或国民收入)。它是矿产资源经济承载能力的一个主要指标。计算公式为：

$$C_P=TK_Z \quad 或 \quad C_F=YK_Z$$

式中，C_P为现有资源支持的国民生产总值；C_F为预测资源支持的国民生产总值；T为现有探明储量；Y为预测探明储量。

(6) 资源平衡：指矿产资源现有(或预测)探明储量与资源消耗总量之间的差值。反映资源支持经济发展的能力。计算公式为：

$$P_3=T-A \quad 或 \quad P_4=Y-A$$

式中，P_3和P_4为现有或预测探明储量与资源消耗总量平衡。

(7) 消耗平衡：指现有(或预测)矿产资源量支持的国民生产总值(或国民收入)总量域规划经济发展速度下的国民生产总值(或国民收入)总量之间的差值，它从另一个方面反映了矿产资源支持经济发展的能力。计算公式如下：

$$P_5=C_P-G \quad 或 \quad P_6=C_F-G$$

式中，P_5和P_6为现有或预测资源支持能力与规划值之间的平衡。

风库风能、功率的确定方法

王瑞东，黄文华：甘肃西部风库开发的可行性分析 自然资源，1996，3

(1) 库容量Q模型：

$$Q=B\rho u^3st$$

式中，ρ为空气密度；u为流线加密函数；t为时间；s为kW换算系数；B为常数。

(2) 库容功率W_s模型：

$$W_s=B\rho su^3$$

农村工业重心转移轨迹分析公式

樊杰，W.陶普曼：中国农村工业化的经济分析及省际发展水平差异 地理学报，1996，51(5)

$$X=\frac{\sum G_iX_i}{\sum G_i}$$

$$Y=\frac{\sum G_iY_i}{\sum G_i}$$

$$C=\frac{\sigma}{\overline{G}}$$

式中，C为离散系数；G_i为i省农村工业产值在全国总量中的比重；(X_i,Y_i)为其省会城市地理坐标；$\overline{G}$(平均值)$=\frac{\sum G_i}{n}$；σ(标准差)$=\sqrt{\frac{\sum(G_i-\overline{G})^2}{n}}$。

垃圾中甲烷产率计算模型

徐新华，垃圾中甲烷产率计算及全国垃圾甲烷气资源估算 自然资源学报，1997，12(1)

(1) 垃圾填埋场甲烷产率的质量平衡和理论产气量模型：

按IPCC(the Intergovernmental Panel on Climate Change)Guidelines1995年推荐的经验公式，垃圾填埋场CH_4排放的计算公式如下：

$$E_{CH_4}=MSW\cdot\eta\cdot DOC\cdot r\cdot(16/12)\times0.5$$

式中，E_{CH_4}为垃圾填埋场甲烷排放量；MSW为城市垃圾量(municipal solid waste)；η为城市垃圾填埋率；

DOC 为垃圾中可降解有机碳的含量，IPCC 推荐值发展中国家为 15%；发达国家为 22%，此处采用 15%；r 为垃圾中可降解有机碳的分解百分率，IPCC 推荐为 77%(定为常数)。

按此公式计算 1t 垃圾填埋产甲烷气的量为：

$$E_{CH_4} = 1 \times 100\% \times 15\% \times 77\% \times (16/12) \times 0.5 = 0.077\text{t}$$

(2) 垃圾填埋场甲烷产率的理论动力学模型：

按照 N.Gardner 和 S.D.Probert 提出的模式：

$$P = C_d X \sum_i F_i \left(1 - e^{-K_i t}\right)$$

式中，P 为单位重量垃圾时间 t 内的甲烷排放量；C_d 为垃圾中可降解的有机碳百分率；X 为填埋场产气中 CH_4 的份额；F_i 为各降解组分占有机碳的含量；K_i 为各降解组分的降解系数(a^{-1})；t 为填埋时间。

矿产资源经济指数计算公式

方创琳，董锁成：中国沿海地区矿产资源态势与跨世纪可持续发展战略．地理研究，1997，16(1)

$$\sigma_t = \frac{(P_0 + \Delta P_t)/P_0}{(Q_0 + \Delta Q_t)/Q_0} = \frac{\alpha_t}{\beta_t}$$

式中，σ_t 为矿产资源经济指数；P_0、α_t 分别为基准年和 t 年矿产资源工业储量潜在价值及指数；Q_0，β_t 分别为基准年和 t 年沿海地区工业总产值及指数；ΔP_t，ΔQ_t 分别为矿产潜在价值减量与工业总产值增量。

矿产资源开发管理模型

汪云甲：关于矿产资源开发管理中几个问题的研究．自然资源学报，1998，13(2)：

设井田或块段储量为 Q，矿井或块段设计年生产能力为 A，在当前技术水平下，该类资源能够达到的(核定)回采率为 k_0，另一开采方案回采率为 k_1，两方案开采期间年净收益相同。显然，两方案对应的服务年限分别为 $n_0 = \frac{Q}{A}k_0$ 及 $n_1 = \frac{Q}{A}k_1$。则可提出一种可用于评价及强制性回采率标准确定的判别式：

$$\frac{\sum_{t_0=0}^{n_0}(P_{t0} - C_{t0})(1+\alpha\gamma)^{t_0}}{\sum_{t=0}^{n_1}(P_t - C_t)(1+\alpha\gamma)^{t}} \leqslant 1 \qquad (1)$$

$$P_0 - C_0 - P - C \leqslant 0 \qquad (2)$$

式中，P_{t0} 和 P_t 分别表示用标准方案(回采率为 k_0)及评价方案(回采率为 k_1)开采某块资源时，第 t 年获得的收入；P_0 和 P 为(静态)总收入；C_{t0} 和 C_t 为相应(可比)费用，α 为系数，用来控制折现在资源保护方面的负面影响，当 $\alpha = 0$ 时，式(1)即变为式(2)；γ 为折现率

暴雨洪水分析的设计模型

张汉雄，杨新民，郭保安：黄陵煤矿采煤中水土流失及其防护工程设计．水土保持通报，1998，18(3)

(1) 设计暴雨模型：

$$i = \frac{aN^b}{t^n} = \frac{S_n}{t^n}$$

$$h = it$$

式中，i 为暴雨强度；h 为暴雨量；S_n 为雨力；t 为暴雨历时；N 为重现期；a 和 b 为雨力参数；n 为暴雨衰减指数。

(2) 设计洪水模型：

$$Q_m = 0.278\alpha\frac{S_n}{\tau^n}F$$

$$\tau = \frac{0.278L}{mQ_m^{1/4}J^{1/3}} = \tau_0\alpha^{-1/4-n}$$

式中，Q_m 为洪峰流量；L 为沟长；J 为沟比降；F 为集水面积；α 为成峰暴雨径流系数；m 为集流参数；τ 和 τ_0 为汇流造峰历时。

矿产资源战略开发综合决策的模糊优选模型

王宏伟，唐中实：矿产资源战略开发评价模型与白山市矿产资源开发．资源科学，1999，20(6)

$$u_i = \frac{1}{1+\left[\frac{\|W(G-R_j)\|}{\|W(R_j-B)\|}\right]^2} = \frac{1}{1+\left[\frac{\sum_{i=1}^{m}(w_i(g_i - r_{ij}))^p}{\sum_{i=1}^{m}(w_i(r_{ij}-b_i))^p}\right]^{\frac{2}{p}}}$$

式中，r_{ij} 为第 j 个矿产种类的第 i 个评价因素的指标取值；$R = (r_{ij})_{m\times n}$ 为指标隶属矩阵 $\vec{G} = (g_1, g_2, \cdots, g_m)^T$ 为优等矿产种类方案的向量表达式；$\vec{R} = (b_1, b_2, \cdots, b_m)^T$ 为次等矿产种类开发方案的表达式；$\vec{W} = (w_1, w_2, \cdots, w_m)$ 为 m 项指标的权重向量表达式。

税前利润的一定服务年限内开采整个矿体地质储量获得最大优化模型

李昌宁，任凤玉，徐小荷：我国矿产资源开采中的损失贫化浅析．自然资源学报，2000，15(1)

$$M(g_k,u_k)_{\max}=\sum_{k=1}^{t}\left[-c_0+\frac{(R_k-C_s)r_e r_v u_k\times T(g_k)E(g_k)}{1+b}-\frac{C_c u_k T(g_k)r_v}{1+b}-C_m u_k\right](1+i)^{-k}$$

约束条件为：

$$\sum_{k=1}^{t}u_k/(1+b)\leqslant Y$$

$$u_k\leqslant U_{0k}$$

$$u_k T(g_k)r_v/(1+b)\leqslant S_0$$

$$u_k T(g_k)E(g_k)r_e r_v/(1+b)\leqslant R_0$$

$$u_k T(g_k)E(g_k)r_e r_v/(1+b)\leqslant R_{\min}$$

$$u_k>0$$

$$g_{\min}<g_k<g_{\max}$$

$$(k=1,2,3,\cdots,t)$$

式中，u_k 为第 k 年矿山采剥量；U_{0k} 为第 k 年矿山最大可能采剥能力；S_0 和 R_0 为选厂和冶炼厂年金属生产能力；t 为生产年限；C_0 为固定生产成本；C_m、C_c 和 C_s 分别为采矿、选矿和冶炼单位可变成本；g_k 为第 k 年开采边界品位；Y 为矿体储量；R_k 为第 k 年金属价格；r_e 和 r_v 分别为选冶综合回收率及采矿回收率；b 为剥采率；i 为贴现率；$R_{\min}$ 为年金属最低产出量；$g_{\min}$ 为可能最小入选矿石品位；$g_{\max}$ 为可能最大地质品位；$T(g_k)$ 和 $E(g_k)$ 分别为“边界品位—矿量比例”分布函数和“边界品位—平均品位”分布函数。

矿山资产评估模型

谢英亮，陈南：一种基于期权定价理论矿山资产评估简化模型，资源科学，2000，22(1)

（1）期权定价的 Black-Sholes 模型：

$$C=e^{-rT}[FN(d_1)-XN(d_2)]$$

$$d_1=\frac{\ln\left(\frac{F}{X}\right)+\frac{\sigma^2}{2}T}{\sigma\sqrt{T}}$$

$$d_2=d_1-\sigma\sqrt{T}$$

式中，C 为欧式看涨期权的价格；X 为执行价格；T 为一年表示的权利期间的长短；r 为瞬间的无风险利率；N 为累积正态分布函数；F 为商品期货价格；σ 为标的资产价格的波动性。

（2）一种简化的矿山资产评估模型：

$$v=e^{-rT}[FN(d_1)-XN(d_2)]Q_T-f_0e^{-rT}$$

$$d_1=\frac{\ln\left(\frac{F}{X}\right)+\frac{\sigma^2}{2}T}{\sigma\sqrt{T}}$$

$$d_2=d_1-\sigma\sqrt{T}$$

$$V=\sum_{T=1}^{n}v+Le^{-rn}$$

式中，v 为矿山在某一年度 T 的价值；$N(d_2)$ 为期权得以执行的概率；f_0 为停产状态时矿山所担负的固定费用；V 为矿山整个寿命期内的价值；其他同上。

集水区总流失量 A 模型

丁光敏，阮伏水，林福兴等：以集水区为单元进行露天矿水土流失的预测与治理——以福建省安溪县铁峰山花岗岩矿区水土保持方案设计为例，水土保持通报，2000，20(3)

$$A=M+P+G+F$$

式中，M 为矿点水土流失量；P 为疏林地水土流失量；G 为崩岗水土流失量；F 为园地的水土流失量。

可再生能源资源的系统评价模型

李京京，任东明，庄幸：可再生能源资源的系统评价方法及事例，自然资源学报，2001，16(4)

（1）可再生能源资源开发利用的系统动态优化模型：

$$\max\int_0^{\infty}e^{-rt}[U_t(Y_t)-TC(Y_t)]\,\mathrm{d}t$$

$$\text{s.t.}\quad \mathrm{d}R/\mathrm{d}t=f(R)-Y$$

式中，$U_t(Y_t)$ 为社会总收益；$TC(Y_t)$ 为资源利用的总成本；Y_t 为资源流量；R 为资源量；$f(R)$ 为不开采状态下资源的自然增长率，即 $f(R)=\mathrm{d}R/\mathrm{d}t\big|\ Y_t=0$。

上式问题的拉氏函数为：

$$L=e^{-rt}[U_t(Y_t)-TC(Y_t)-\lambda(Y_t-f(R)+\mathrm{d}R/\mathrm{d}t]=L(t,Y_t,\lambda,R,\mathrm{d}R/\mathrm{d}t)\tag{1}$$

当社会总收益达到最大时应满足：

$$\mathrm{d}L/\mathrm{d}Y_t=0,\ \mathrm{d}L/\mathrm{d}R=0,\ \mathrm{d}L/\mathrm{d}\lambda=0$$

即：

$$D = MC + \lambda$$

$$\mathrm{d}\lambda / \mathrm{d}t = (r - \mathrm{d}f / \mathrm{d}R)\lambda$$

$$\mathrm{d}R / \mathrm{d}t = f(R) - Y_t$$

式中，D 为边际效益；MC 为边际成本，λ 为可再生资源的影子价格，它的变化率受增长函数的影响，即：$(\mathrm{d}\lambda / \mathrm{d}t) / \lambda = R - \mathrm{d}f / \mathrm{d}R$；达斯古帕塔称 $R - \mathrm{d}f / \mathrm{d}R$ 为社会贴现率。

若将式(1)看做是单个生产者的决策函数，上述结果仍成立，只是上述公式改写为：

$$P = LRMC + RT$$

式中，P 为能源产品的市场价格；$LRMC$ 为生产者的长期边际成本；RT 则为资源租金，表征生产者使用资源所应付给资源所有的报酬。

(2) 边际成本的计算方法——长期生产平均增量成本(AIC)法：

$$AIC_i = \frac{\sum_{t=t_0+1}^{T} [I_t + (M_t - M_{t_0})] / (1+i)^{t-t_0}}{\sum_{t=t_0+1}^{T} (Q_t - Q_{t_0}) / (1+i)^{t-t_0}}$$

式中，AIC_i 为表示贴现率为 i 的平均增量成本；I_t 表示第 $t-t_0$ 年的产量增量；T 表示开发和生产年限。对一个新建项目，M_{t0} 和 Q_{t0} 均为 0，因此 AIC 就是长期平均成本。

(3) 全寿命期成本的计算公式：

$$PV = I - (V_n a^{-n}) + \sum a^{-j}(M_j + R_j) + \sum PQb^{-j}$$

式中，PV 为该能源系统全寿命期成本的总现值；I 为该系统初始投资总成本。V_n 为寿期终了的第 n 年设备的残值；a 为贴现率 d 时的简单现值公式，即：$a = (1+d)$，$j = 1$ 到 n 年；M_j 为第 j 年的维护成本；R_j 为第 j 年的设备修理及更换成本；P 为所消耗燃料的初始价格；Q 为所需的燃料量(计入设备效率)；b 为通货膨胀率为 e 时考虑燃料费的上涨计算第 j 年现值的公式，即：$b = (1+e)(1+d)$。

第十三章 农业地理

温度差值公式

么枕生：中国境内农业指标温度的出现日期、持续日数与积算温度. 地理学报,1957, (23)2

$$Y'_n = Y_n + \frac{\sigma(y)}{\sigma(x)}(X_N - X_n)$$

式中，Y_n 为 Y 站 N 年月平均温度；X_N 和 X_n 分别为台站 X 在 N 和 n 年内的平均温度；Y'_n 为 Y 站的订正值.

农作物种植密度与小气候关系式

傅抱璞：农作物种植密度与小气候. 地理学报，1964, 30(4)

(1) 密度与光照：

$$m_p = A - B \cdot \ln N$$

式中，m_p 为透光率；N 为种植密度；A 和 B 均为决定于作物品种、发育阶段和农业技术措施的常数。

(2) 密度与温度：

$$T = T_1 - C \lg \frac{N}{N_1}$$

式中，T_1 和 T 分别代表在某一已知种植密度 N_1 和任意种植密度 N 下的作物地中的气温或土温；C 为一个决定于作物品种、发育阶段、农业技术措施、地理条件和季节等因素的常数。

(3) 密度与湿度：

$$W = W_0 - a \cdot N$$

$$r = r_0 - b \cdot N$$

式中，W 和 r 为在种植密度为 N 时作物地中的土壤湿度和空气相对湿度；W_0 和 r_0 为裸地的相应湿度；a 和 b 为决定于作物品种、发育阶段、农业技术措施、地理条件和季节等因素的参数。

(4) 密度与风速：

$$u = u_0 \cdot \exp(-f \cdot N)$$

式中，u 为作物地中的风速；N 为种植密度；u_0 为开旷地方或植株上方某一定高度上的风速；f 为决定于植物品种、发育情况、测定 u 与 u_0 的高度及农田中测点位置的常数。

(5) 密度与产量：

$$M + \sum_{i=1}^{n} m_i = \sum_{i=1}^{n}(\bar{f}_i \cdot \bar{P}_i \cdot T_i) - \sum_{i=1}^{n}(\bar{r}_i \cdot \bar{P}'_i \cdot T'_i)$$

式中，M 为在收获时整个植物的干重量(减去由于无机养料得出来的而非光合作用制造出来的氮和灰)；m_i 为在各个生长期间脱落的植物部分的干重量；$\bar{f}_i$ 和 $\bar{P}_i$ 分别为在各个生长期间光合作用的平均强度和进行光合作用的平均叶面积；$\bar{r}_i$ 和 $\bar{P}'_i$ 分别为在相应期间内呼吸作用的平均强度和植物呼吸的面积；T_i 和 T'_i 分别表示在各个生长期间光合作用和呼吸作用的持续时间。

集成的土壤水亏缺模型

Smith G W：特立尼达岛椰子种植园中降水、土壤水和干椰子肉产量之间的关系. Journal of Applied Ecology, 1966, 3(1)

(a) 如果 $P_n \geqslant D_{n-1}$，

$$D_n = D_{n-1} - P_n + E_n$$

(b) 如果 $P_n < D_{n-1}$，

$$D_n = (D_{n-1} - P_n)(1 - E_n K) + E_n$$

式中，$K = 100/AX(Y-Z)$，X 是根穿透的深度，Y 是达到田地容量时土壤含有的水量(% 干重)，Z 是在萎蔫点时土壤含有的水量(% 干重)，A 是土壤的表观比重；D_n 是第 n 周末时的水分亏缺；P_n 是第 n 周期间的降水量；E_n 是第 n 周期间的潜在蒸发力。

从 1941 到 1959 年这段时期里，直到收获年份的开始的 29 个月 (x) 对于整体的土壤水亏缺，每英亩每年 (y) 的干椰子肉产量换算成英镑的形式表示的回归方程为：

$$10y = 19\,200 - x$$

蒸发作用(E_n)估算模型

Rijks D A：阿拉伯南部 Abyan 地区棉花作物的水分使用. Journal of Applied Ecology, 1966, 2(2)

$$E_m = \frac{R_n - G}{1-\beta}$$

式中，β 是 Bowen 比率：可感知的热流量和潜在的热流量之间的比例 γ 是干湿度常数，可表达为 $\beta = \gamma \frac{dT_a}{de_d}$，$T_a$ 是平均大气温度，e_d 是在平均露点温度下的饱和水汽压；R_n 是每小时净辐射的平均测量值；G 是每小时土壤热流量的平均测量值。

农作物树冠的热力平衡方程

Monteith J L, Szeicz G, Waggoner P E：田地中气孔阻力的测量和控制. Journal of Applied Ecology, 1966, 2(2)

$$\frac{\lambda E}{H} = \frac{(\Delta/\gamma)+(r_i/r_a)}{(\Delta/\gamma)+1+(r_s/r_a)}$$

式中，λE 是潜伏热；H 是大气紊流引起的总的热交换率；Δ 是饱和水汽压曲线的斜率；γ 是干湿计常数；r_i 是一个每天和每个季节随主导天气而改变的带有扩散阻力维的量；r_a 是大气层表面和高度 z 之间的扩散阻力；r_s 是气孔和表皮的总扩散阻力。

喷洒区和非喷洒区的蒸腾作用相对比率：

$$\frac{E^*}{E} = \frac{(\Delta/\gamma)+1+(r_s/r_a)}{(\Delta/\gamma)+1+(r_s^*/r_a)}$$

式中，E 是非喷洒植物的蒸腾作用率；E^* 是当表面阻力为 r_s^* 时，喷洒植物的蒸腾作用率。

黄土坡耕地水土流失计算公式

中国科学院地理研究所水文研究所：黄土坡耕地水土流失计算方法的探讨. 地理学报，1966，32(2)

(1) 黄土坡耕地暴雨径流量计算公式：

$$R = \left[i-(a-bP_a)(1-e^{-\alpha i})\right](t-\frac{c}{i^m}) - \frac{c\eta}{i^m \ln\eta}\left\{1-\exp\left[-\left(\frac{i^m t\ln\eta}{c}-\ln\eta\right)\right]\right\}$$

式中，$\eta = 1-\frac{(a-bP_a)(1-e^{-\alpha i})}{i}$；$c = C_m - \mu P_a$；$i$ 为降雨强度；P_a 为前期土壤含水量；C_m 为土壤吸水性系数；m 为吸水性指数；a、b 和 c 为待定参数。

(2) 黄土坡耕地暴雨冲刷量计算式：

$$E_p = K_e(P+P_a)^a i^b R^c q^d$$

式中，$P+P_a$ 为降雨总量与 5cm 土壤层前期含水量(mm)；i 为产流时段的降雨强度(mm·min^{-1})；R 为总径流深(mm)；q 为产流时段的单宽流量(ml·s^{-1}·m^{-1})；K_e 为系数；a、b、c 和 d 为待定参数。

蒸腾作用模型

Rutter A J：大农场环境中 *Pinus sylvestris* 与水的关系的研究 V. 对土壤水状况的反应. Journal of Applied Ecology, 1967, 4(1)

$$Y = \bar{y} + 12(x_1 - \bar{x}_1) + 0.77(x_2 - \bar{x}_2)$$

式中，$\bar{y}$ 是白天的平均蒸腾作用率；x_1 是太阳辐射；x_2 是大气的饱和亏损。

农作物种植中产量/密度响应的数学关系式

Rees A R, Turquand E D：种植密度对郁金香球茎产量的影响. Journal of Applied Ecology, 1968, 5(2)

$$w^{-1} = \alpha + \beta\rho$$

式中，w 是每个植物的平均权重；ρ 是种植密度；α 和 β 是常数。

净辐射和土壤热力流模型

Rijks D A：苏丹灌溉棉花的水分利用 II. 净辐射和土壤热力流. Journal of Applied Ecology, 1968, 5(3)

(1) 净辐射：

$$R_n = \frac{(1-\alpha)R_c}{1+\beta} + L_0$$

式中，R_n 是净辐射；α 是反射系数；R_c 是收入的短波辐射；β 是“加热系数”；L_0 是短波辐射缺乏时的净长波损失。

(2) 24 小时中的净长波损失（R_B）：

$$R_n = (1-\alpha)R_c + R_B$$

当缺乏这些测量值时，R_B 通常由下式计算：

$$R_B = -\sigma T_a^4(a+b\sqrt{e})(d+fn/N)$$

式中，T_a 是平均大气温度；e 是平均水汽压；a,b,d 和 f 是回归方程系数；n 是晴天实际小时数；N 是白昼的总小时数；σ 是 Stefan-Boltzmann 常数。

(3) 加热系数：

$$\beta = \frac{L_\uparrow + L_0 - L_\downarrow}{(1-\alpha)R_c + L_\downarrow - L_\uparrow - L_0}$$

式中，$L_\uparrow$ 是发出的长波辐射；$L_\downarrow$ 是收入的长波辐射。

(4) R_n 和 R_c 的白天总量之间的关系：

$$\frac{R_n}{R_c}=\frac{1-\alpha_d}{1+\beta}+\frac{L_0}{R_c}$$

式中，α_d 是平均每天反射系数。

农作物的向下净长波损失(L_d)模型

Stanhill G, Cox J T H, Moreshet S：农作物和气候因子对灌溉玉米作物的辐射平衡的影响．Journal of Applied Ecology, 1968, 5(3)

$$L_d/\sigma T_a^4=a+b\sqrt{e}$$

式中，σ 是 Stefan-Boltzmann 常数；T_a 是大气温度；e 是水汽压；a 和 b 是经验常数。

鲍恩比率和平流能量模型

Rijks D A：苏丹灌溉棉花中的水分利用 III.鲍恩比率和平流能量．Journal of Applied Ecology, 1971, 8(3)

(1) 鲍恩比率：

$$\beta=\frac{c_p\rho}{\varepsilon L}\cdot\frac{K_H}{K_v}\cdot\frac{\delta T/\delta z}{\delta e/\delta z}$$

式中，β 是鲍恩比率(即可感知的和潜在的热力流之间的比值)；c_p 是潮湿大气的比热；ρ 是大气密度；ε 是水蒸气摩尔质量与大气摩尔质量的比值；L 是蒸气的潜热；K_H 是热量的漩涡扩散；K_v 是水蒸气的漩涡扩散；T 是干球温度；z 是高度；e 是水汽压。

(2) 蒸发作用的垂直分量 E_v：

$$E_v=\frac{R_n+G}{1+\beta}$$

(3) 可感知热量的垂直流动 H_v：

$$H_v=\frac{\beta(R_n+G)}{1+\beta}$$

(4) 在一段已知时期中，z_1 和 z_2 之间的潜热水平流动的差值：

$$\Delta E_h=\int_{z_1}^{z_2}\frac{L\rho\varepsilon}{p}\cdot\bar{u}_z\cdot\frac{\delta e_z}{\delta x}\delta z$$

(5) 可感知热量的水平流动差值：

$$\Delta H_h=\int_{z_1}^{z_2}c_p\bar{\rho}\cdot\bar{u}_z\cdot\frac{\delta Tz}{\delta x}\delta z$$

(6) 作物质量中的能量储量为：

$$\Delta H_c=\int_0^z c\rho_c\frac{\delta T}{\delta t}\delta z$$

式中，R_n 是净辐射；G 是土壤热流量；p 是大气压；$\bar{u}_z$ 是一定高度的平均风速；$\bar{\rho}$ 是平均大气密度；x 是前缘距离，e_z 和 T_z 分别为高度为 z 时的水汽压和温度；ρ_c 是比热为 c 时的大气密度。

植物植冠的风剖面-分析模型

Landsberg J J, James G B：植物植冠的风剖面-分析模型研究．Journal of Applied Ecology, 1971, 8(3)

(1) 小麦田中的风剖面(Inoue, 1963)：

$$u(z)=u_h\exp\left[-c\left(1-\frac{z}{h}\right)\right]$$

式中，$u(z)$ 是任意高度 z 的风速；h 代表植冠顶层；c 是衰减系数。

(2) Saito(1964)提出：

$$u(z)=u_h\exp\left(-\int_z^h P\cdot dz\right)$$

式中，P 是一个仅依赖于高度的比例因子。

(3) 在引文中，提出了 4 种作物，有：

$$u(z)=u_h\left[1-a\exp\left(-\frac{b}{S(z)}\right)\right]$$

式中，a 和 b 是经验系数；$S(z)$ 是叶面积指数；从植冠表面向下累积。

(4) 所有的风剖面也满足：

$$u(z)=u_h\left[1-a\frac{S(z)}{S(z)-b}\right]$$

(5) 动量转移方程中一个解析风剖面：

$$u(z)=u_h\left(1+h\frac{\sqrt{(C_d L u_h)}\cdot x}{6K}\right)^{-2}$$

式中，$x=1-z/h$；C_d 是阻力系数；L 是单位体积中的叶面积；K 是一个常数。

在一个完善的植被对动量吸收的分析中，Thom (1971) 得出了相同的解析风剖面：

$$u(z)=u_h\left[1+\alpha\left(1-\frac{z}{h}\right)\right]^{-2}$$

农作物特性同化作用与蒸腾作用比率模型

Jones H G：农作物特性的同化作用和蒸腾作用之间的比率．Journal of Applied Ecology, 1976, 13

(1) 表面上每单位面积的蒸发作用 E：

$$E = \frac{\varepsilon r^{hr} R_{ni} / \lambda + e}{\varepsilon r^{hr} + r_a^w + r_l^w}$$

式中，ε 是随着体感热量的增加，饱和大气潜在热量的增加率；e 是环境温度下周围环境大气和饱和大气之间的水蒸气浓度差；λ 是大气温度下的蒸发潜热；r_a 和 r_l 分别是边界层中和树叶中的传输阻力；上标 w 指水蒸气；r^{hr} 是长波辐射和体感热量传输中热量损失的平行阻力；R_{ni} 是等温净辐射。

(2) 净光合作用率 P：

$$P^2(r_t) - P(P_m^I r_t + k' + c_w - \Gamma) + P_m^I(c_w - \Gamma) = 0$$

式中，P_m^I 是一定光照(I)下的最大潜在光合作用率；k' 是一个常数；r_t 是通过第一步时 CO_2 吸收的阻力；Γ 是 CO_2 补偿浓度；c_w 是细胞间的 CO_2 浓度。

$$P_m^I = \frac{P_m^m(I - I_c)}{k'' + (I - I_c)}$$

式中，P_m^m 是光照和 CO_2 饱和时的光合作用率；k'' 是一个常数；I_c 是光补偿点 I。

井渠结合供水模型

河套平原竖井排灌与井渠结合的研究．自然资源，1977，1

$$Q = \frac{q(1 - Pn) - Y + X}{n(1 - N) + N}$$

$$G = \frac{nq(1 - N + NP) + N(Y - X)}{n(1 - N) + N}$$

式中，Q 为地表水毛供水量；G 为地下水合理开采量；q 为净灌水量；Y 为降雨入渗补给量；X 为某一深度地下水蒸发量；N 为渠系有效利用系数；P 为田间水量损失系数；n 为灌溉渗漏补给地下水量、占灌溉总损失水量的百分数。

鲢鳙渔产力模型

杜佳垠：东北地区湖泊水库鲢鳙渔业利用问题．自然资源，1977，2

$$鲢鱼生产力\ (\mathrm{kg \cdot hm^{-2}}) = \frac{MP}{N}K$$

$$鳙鱼生产力\ (\mathrm{kg \cdot hm^{-2}}) = \frac{MP}{N}K$$

式中，M 为实际亩产量；P 浮游生物年平均量；N 为鲢鳙增肉浮游生物指数(个 · $\mathrm{kg^{-1}}$)；K 为浮游植物可利用率系数。

小麦蒸发作用中叶面水势模拟模型

Jones H G: 模拟小麦蒸发作用中叶面水势的每日趋势．Journal of Applied Ecology. 1978, 15

(1) 模型 1：

$$\psi_L = \psi_S - aE/(1 + bE)$$

式中，ψ_L 是叶面水势；ψ_S 是大块土壤的水势；E 是蒸发作用率；a 和 b 是系数。

(2) 模型 2：

$$\mathrm{d}\psi_L / \mathrm{d}t + \psi_L / (r_{sp} C_L) = \psi_S / (r_{sp} C_L) - E / C_L$$

式中，t 是时间；r_{sp} 是土壤-植物路径中对水流的总阻力；C_L 是叶片的容量。

农田土壤水分状况的估算模型

杨勤业：西藏农田土壤水分状况的估算和灌溉问题．自然资源，1978，2

(1) 彭曼水面蒸发 E_0 模型：

$$E_0 = \frac{\frac{\delta}{r}\frac{1}{L}R_0 + E_a}{\frac{\delta}{r} + 1}$$

式中，E_0 为水面蒸发；R_0 为水面辐射净值；δ 为饱和水汽压对温度的比值；r 为干湿球表常数；L 为蒸发潜热；E_a 为空气干燥力。

(2) 蒸发力 E^* 模型：

$$E^* = \frac{\frac{\delta}{r}\frac{1}{L}R + E_a}{\frac{\delta}{r} + 1}$$

式中，R 为农田辐射净值。

干燥度的计算式

丘宝剑，卢其尧：中国农业气候区划试论．地理学报，1980, 35(2)

$$K = \frac{0.16\sum t}{r} \tag{1}$$

式中，$\sum t$ 为 < 10℃的积温；r 为同时期的降水量。

$$D = \frac{\sum d}{r} \tag{2}$$

式中，Σd 为年(或月)饱和差的总和(mb)；r 为年(或月)的降水量(mm)。

作物最大生产力模型

中文元：作物最大生产力——以华北地区冬小麦为例．自然资源，1980，3

(1) 有效光合能量Q_ϕ模型：

$$Q_\phi = S_\phi + D_\phi$$

$$S_\phi = K_S \cdot \int_{0.20}^{4.00} S_{(\lambda)} d\lambda$$

$$D_\phi = K_D \cdot \int_{0.20}^{4.00} D_{(\lambda)} d\lambda$$

式中，S为太阳直接辐射；D为散射辐射；K为系数。

(2) 作物生产力的上限——兰伯特定律：

$$Q_{\phi i} = Q_{\phi 0}(1 - e^{-\alpha L})$$

式中，$Q_{\phi i}$、$Q_{\phi 0}$分别为群体内某一层i与植物表层0的Q_ϕ值；L为作物的叶面积系数；α为消光系数。

(3) 限制最大生产力的因子：

1)同化面积影响模型：

$$\bar{\beta} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{L} \frac{dA}{dt} dt$$

式中，$\bar{\beta}$为时段$t_2 - t_1$内的平均净同化率；$\frac{dA}{dt}$为在瞬时刻t的干物质A变化状况；L为叶面积。

2)温度影响模型：

$$T_n = T_a + \frac{P}{\rho C_p D}$$

式中，T_n为叶温；T_a为离地面2m高度处的气温；P为近地面的显热通量；ρ为空气密度；C_p为空气的定压比热；D为乱流交换的扩散系数。

坡地与水平梯田湿润状况的气候学分析公式

陈明荣：坡地与水平梯田湿润状况的气候学分析．地理学报，1980，35(4)

(1) 坡地与水平梯田蒸发力的差别(坡地与梯田蒸发力的差别可以用地面辐射平衡的差别表示)：

$$R_{\beta\alpha} = (Q_{\beta\alpha} + q_{\beta\alpha} + S_{\beta\alpha}) + (1 - \nu) - F_{\beta\alpha}$$

$$R_{\beta 0} = (Q_{\beta 0} + q_{\beta 0} + S_{\beta 0}) + (1 - \nu') - F_{\beta 0}$$

式中，$R_{\beta\alpha}$为坡向β和坡度α坡地上的辐射平衡；$R_{\beta 0}$为坡向β的坡地上修成水平梯田后的辐射平衡；$Q_{\beta\alpha}$和$Q_{\beta 0}$分别为坡向β的坡地上和水平梯田上的直接辐射；$q_{\beta\alpha} = q\cos^2\frac{\alpha}{2}$为坡向$\beta$的坡地上的散射辐射，$q$为开旷平地的散射辐射；$q_{\beta 0} = q\cos^2\frac{\theta}{2}$为坡向$\beta$水平梯田上的散射辐射，$\theta$为水平梯田的仰角；$S_{\beta\alpha} = \bar{S}\sin^2\frac{\alpha}{2}$为坡向$\beta$的坡地上的反射到坡地及梯田上的反射辐射，$\bar{S}$表示斜坡前面和左右地面的平均反射辐射；$S_{\beta 0} = \bar{S}\sin^2\frac{\theta}{2}$为坡向$\beta$水平梯田上的反射到坡地及梯田上的反射辐射；$F_{\beta\alpha} = F\cos^2\frac{\alpha}{2} + (\sigma_1\sigma T_{\beta\alpha}^4 - \sigma_2\sigma T^4)\sin^2\frac{\alpha}{2}$为坡向$\beta$的坡地上的有效辐射，$F$表示开旷平地的有效辐射，$\sigma_1$，$\sigma_2$分别为坡地和四周地面的相对辐射率，$\sigma$为波尔兹曼常数，$T_{\beta\alpha}$为坡地的温度、$T$为四周平地的温度；$F_{\beta 0} = F\cos^2\frac{\alpha}{2} + (\sigma_1\sigma T_{\beta 0}^4 - \sigma_2\sigma T^4)\sin^2\frac{\alpha}{2}$为坡向$\beta$的水平梯田上的有效辐射，$T_{\beta 0}$为水平梯田的温度；$\nu$和$\nu'$分别为坡向$\beta$的坡地上和水平梯田上的反射率。

(2) 坡地与水平梯田干湿状况差别的计算：

设雨滴降落的方位为β_r(相当于风向)，与垂直方向的偏角为φ，则在坡向为β、坡度为α斜坡上的降水量可表达为：

$$r_{\beta\alpha} = r_0\{\cos\alpha + \sin[\tan\varphi\cos(\beta - \beta_r)]\}$$

式中，r_0为水平面上的降水量。

坡地干燥度可表达为：

$$D_{\beta\alpha} = \frac{E_{\beta\alpha}}{r_\alpha}$$

式中，r_α为坡度α斜坡上的降水量；$E_{\beta\alpha}$为坡向β、坡度α坡地上的蒸发力。

水平梯田干燥度：

$$D_{\beta 0} = \frac{E_{\beta 0}}{r_0}$$

式中，$E_{\beta 0}$为坡向β的坡地上修成水平梯田后的蒸发力；r_0为水平面上的降水量。

套作玉米系统的数学模型

齐文虎，李立贤，倪建华：应用系统理论的方法建立套作玉米系统的数学模型．生态学报，1981，1(1)

(1) 数学模型的求解方法(平作玉米系统)：

1)光辐射到叶面积和从叶面积到干物质的传递函数为：

$$G_1(s)=P(s)/F(s)=\frac{\frac{p_0}{s}+\frac{p_1}{s^2}+\frac{2p_2}{s^3}}{\frac{a_0}{s}+\sum_{n=1}^{4}\frac{a_n s+b_n(n\omega)}{(n\omega)^2+s^2}}$$

$$G_2(s)=X(s)/P(s)=\frac{v_0s^3+v_1s^2+2v_2s+6v_3}{s\left(p_0s^2+p_1s+2p_2\right)}$$

2)由太阳辐射能转换成干物质的整个平作玉米系统的传递函数为：

$$G(s)=\frac{X(s)}{F(s)}=G_2(s)\cdot G_1(s)$$

(2) 两茬玉米接受光能的相互影响：

套作玉米系统中两茬玉米间争光关系的传递函数：

$$D_{32}(s)=\frac{F(s)G_1(s)-P_2(s)}{P_3(s)G_1(s)}$$
$$D_{23}(s)=\frac{F(s)G_1(s)-P_3(s)}{P_2(s)G_1(s)}$$

(3) 套作玉米系统整体的传递函数：

从 $F(s)$ 到 $Y(s)$ 的传递函数：

$$T(s)=\frac{G_1(s)\left[k_2D_{32}(s)+k_3D_{23}(s)\right]-1}{D_{32}(s)D_{23}(s)G_1^2(s)-1}G_1(s)G_2(s)$$

光合速率 P 与气孔数的正相关模型

殷世俭，刘祚昌，余彦波等：小麦和玉米光合性状比较研究．自然资源，1981，1

$$P=\frac{(CO_2)_a-(CO_2)chl}{r_a+r_s+r_m}$$

式中，$(CO_2)_a$ 为大气 CO_2 浓度；$(CO_2)chl$ 为叶绿体反射中心的 CO_2 浓度；r_a 为大气阻抗；r_s 为气孔阻抗；r_m 为叶肉细胞阻抗

套作玉米系统与农作物生长过程的数学模型

齐文虎，李立贤：系统分析在自然资源综合考察研究中的应用．自然资源，1981，1

(1) 套作玉米系统的数学模型：

系统的传递 $G(s)$ 函数：

$$G(s)=G_2(s)\cdot G_1(s)$$

$$G_1(s)=\frac{\frac{p_0}{s}+\frac{p_1}{s^2}+\frac{2p_2}{s^3}}{\frac{a_0}{s}+\sum_{n=1}^{4}\frac{a_n s+b_n(n\omega)}{(n\omega)^2+s^2}}$$

$$G_2(s)=\frac{v_0s^3+v_1s^2+2v_2s+6v_3}{s(p_0s^2+p_1s+2p_2)}$$

(2) 农作物生长过程的数学模型：

1)农作物干物质增长的状态方程：

$$N=N_0e^{rt}$$

式中，N 为某一时刻的干物重；r 为农作物光合作用的效率 b 与呼吸作用的效率 a 之差。

2)净增长率 $r(t)$ 动态模型：

$$r(t)=\frac{b}{b+ae^{t}}$$

两种种植方式的光合潜力计算模型

邓根云：京郊两种种植方式的光合潜力的初步探讨．自然资源，1981，4

(1) 受光量：

作物群体的受光量 I_s 模型：

$$I_s=C\cdot\frac{I_{la}}{I_{la\max}}\cdot I_0$$

式中，I_0 到达作物层顶部的太阳辐射能；C 为结构系数；I_{la} 为各个时期的叶面积系数；$I_{la\max}$ 为作物群体的最大叶面积系数。

(2) 光合效率：

1)冠层内的光分布模型：

$$I_z=I_0\exp(-KL)$$

式中，I_z 为冠层内 z 高度处的辐射强度；I_0 为冠层顶辐射强度；L 为于冠层顶至 z 高度处的叶面积系数；K 为消光系数。

2) 光合强度 A 模型：

$$A=\frac{bI}{1+aI}-r$$

式中，r 为呼吸强度；I 为单位面积接收的辐射强度；a 和 b 为曲线拟合常数

3)净同化速度 P 模型：

$$P=\frac{b}{Ka}\ln\frac{1+aKI_0}{1+aKI_G}-rL$$

质量综合指数 P_m 模型

宋廷洲：禹县土地质量评价方法. 自然资源，1981，4

$$P_m=\sum_{i=1}^{n}a_i$$

式中，a 为土壤质量鉴定因素；i 为鉴定因素的某一项；n 为鉴定因素数量。

水稻的光温气候潜力模型

王书裕：东北及内蒙古东部地区水稻的光温气候潜力. 自然资源，1981，4

(1) 水稻生育期的太阳辐射：
总辐射量 Q 模型

$$Q=Q_0(a+bS/S_0)$$

式中，Q_0 为大气上界的总辐射；S 为日照时数；S_0 为可照时数；a 和 b 为系数。

(2) 水稻的光温生产潜力及其计算方法：
水稻光温生产潜力模型

$$W=923\cdot F\cdot\sum P_{ti}Q_i \qquad (i=4,5,\cdots,9)$$

式中，W 为光温生产潜力；F 为光能利用率；P_{ti} 为温度影响系数；Q_i 为总辐射；i 为月份。

土地等价率(LER)

Risch S J, Hansen M K. 在哥斯达黎加的单作和混合种植中谷物、豆类和南瓜的生长、开花和结果. The Journal of Applied Ecology, 1982, 19

LER 被定义为单作时，为达到作物在混合种植时一公顷土地上的总产量而需要的土地的总公顷数。

$$\text{LER}=\sum_{i=1}^{n}\frac{Y_{pi}}{Y_{mi}}$$

式中，Y_{pi} 是第 i 种农作物的间作产量；Y_{mi} 是第 i 种农作物的最佳单作产量。

温室加热量与换气量的计算公式

卢其尧：我国温室加热量与换气量的农业气候学分析. 地理研究，1982，1(2)

(1) 温室加热量计算公式：
低温期间(夜晚或寒冷的白天)

$$H_t=\frac{1}{R}\int_{\tau}K_H(T_C-T_0)dt-(1-a)\int_{\tau}R_{is}dt$$

式中，H_t 为温室每单位床面积在一定时间内的加热量；$R=A_f/A_\omega$ 为温室保温比；τ 为时间长度；K_H 为放热系数；T_C 为温室气温；T_0 为外界气温；a 为床面的反射率；$R_{is}=bR_s$ 为温室内的太阳辐射量。

夜间

$$H_t=\frac{K_H}{R}\int_{\tau}(T_C-T_0)dt$$

(2) 温室日加热度计算公式：
当 $T_C\geqslant T_H$ 时：

$$d_H=24(T_C-T_M)-S\left(T_C-\frac{T_H+T_M}{2}\right)$$

当 $T_C<T_H$ 时：

$$d_H=24(T_H-T_M)\left(\frac{T_C-T_L}{T_H-T_L}\right)^2-\frac{S}{2}\frac{(T_C-T_M)^2}{T_H-T_M}$$

式中，d_H 为日加热度时；T_H 为外界日最高气温；T_M 为外界日平均气温；S 为一日内的日照时间；T_C、T_L 同上；当 $T_C<T_M$ 时作 $T_C-T_M=0$ 处理。

(3) 温室加热量的估算：
1)提供一定热量所必需的燃料消耗量

$$G=\frac{H}{E\cdot F}=\frac{A_f\cdot K_H\cdot d_H}{R\cdot E\cdot F}$$

式中，G 为燃料消耗量；H 为加热量；E 为加热机的热效率；F 为燃料的发热量。

2) 每日必需储热量

$$Q=\frac{A_fH_t}{N}=\frac{A_\omega\cdot K_H\cdot D_{HM}}{N}$$

式中，Q 为每日必需储热量，D_{HM} 为月加热度时，N 为每月的日数，其他变量同上。

(4) 温室换气量的估算：
1) 白天温室的热量平衡方程

$$A_f(S_i-B_i)=A_\omega H_\omega+\rho C_p' Q_V\Delta T$$

式中，S_i 为温室内的净辐射；ρ 为空气密度；C_p' 为空气的有效定压比热；Q_V 为换气量。

2) 温室换气量

$$Q_V = \frac{A_\omega[R(S_i - B_i) - H_\omega]}{\rho C'_P \Delta T}$$

式中，Q_V / A_ω 为换气率；$C'_P = C_P\left[1 + \frac{A}{\Delta T}(e_i - e_0)\right]$，$C_P$ 为空气的定压比热，e_i，e_0 为室内外的水汽压；$A = 0.622 L / C_P \cdot P$，$L$ 为蒸发潜热；P 为大气压；ΔT 为温度差。

3）晴天中午外界的总辐射量与温室内净辐射之间的关系

$$S_i - 0.6Q_{S+D} = 0.6\frac{Q_0 \cos\theta_0}{1 + f\sec\theta_0}$$

式中，Q_{S+D} 为晴天中午外界的总辐射量；Q_0 为太阳常数；θ_0 为中午时的太阳天顶角($=90° - h_0$)，h_0 为太阳高度角；f 为大气透明度有关的系数，随纬度与季节而变。

4）换气回数

$$n = \frac{Q_V}{V} = \frac{(A_f / R)(Q_V / A_\omega)}{V}$$

式中，n 为换气回数；V 为温室体积。

水资源开采利用量模型

方汝林：我国干旱、半干旱地区开辟灌溉水源途径的探讨　自然资源，1982，2

$$Q_{开} = \Delta Q_{河} + \Delta E_{地下水} + \Delta E_{地面水}$$

式中，$\Delta Q_{河}$ 为河道排出区外或入海水量的减少量；$\Delta E_{地下水}$ 为地下水蒸发量；$\Delta E_{地面水}$ 为水面蒸发变量。

粮食作物的生产潜力与粮食生产的稳定性模型

邓根云：从北京地区粮食生产的稳定性看夏秋作物结构问题，自然资源，1983，2

(1) 光能资源与粮食作物的生产潜力

1）气候生产潜力 Y_c 模型：

$$Y_c = \begin{cases} 0 & (T < 0°C) \\ 1.673 \cdot T \cdot Q & (0°C < T < 30°C) \\ 50.2 \cdot Q & (T > 30°C) \end{cases}$$

式中，T 为温度；Q 为太阳辐射。

2）作物生产潜力 Y_a 模型：

$$Y_a = A\sum_i^n Y_c l$$

式中，A 为作物的结构系数；l 为比叶面积；i 为各旬的序号。

(2) 波动产量与系统的稳定性：

波动产量的标准差 S 模型：

$$S = \sqrt{\frac{\sum(y_f - \bar{y}_f)^2}{n-1}}$$

式中，y_f 为波动产量。

灌区水量供需平衡模型

东人瑔：我国平原井渠结合灌区渠灌需水量计算的初步探讨　自然资源，1983，3

(1) 降水的有效水量模型：

1）农田降水的有效水量 B_1 模型：

$$B_1 = P_1 - (Q_{12} + G_{12})$$

式中，P_1 为灌区降落到农田的降水；Q_{12} 为形成地表径流；G_{12} 为补给地下水，形成地下径流。

2）非农田降水的有效水量 B_2 模型：

$$B_2 = P_2 - (Q_{22} + G_{22} + \Delta W_2 + E_{02})$$

式中，P_2 为非农田降水；$Q_{22}, G_{22}, \Delta W_2$ 和 E_{02} 为无效水量。

(2) 侧向地下水补给的有效水量 B_3 模型：

$$B_3 = G_{31} - (G_{32} + Q_{32})$$

式中，G_{31} 为灌区侧向补给的地下水；G_{32} 为地下径流；Q_{32} 为形成地表径流。

(3) 流入灌区地表水的有效水量 B_4 模型：

$$B_4 = Q_{41} - (G_{42} + Q_{42})$$

式中，Q_{41} 为地表水或渠道引水；Q_{42} 为形成地表径流；G_{42} 为形成地下径流。

(4) 井渠结合灌区渠灌需水量模型：

$$Q_{41} = M_1 + Q_{42} + G_{42} + \Delta G_4$$

式中，Q_{41} 为自流灌区渠灌需水量；M_1 为净灌溉需水量；$(Q_{42} + G_{42} + \Delta G_4)$ 为灌溉损失水量。

主要粮食品种矿质元素观测值分析模型

王实玺等：东北中部地区主要粮食中矿质元素背景值的研究　生态学报，1983，3(4)

$$\sigma(\tilde{u}_i) = \frac{1}{g(u_i)}\sqrt{\frac{0.25 - [\phi(u_i)]^2}{n}}$$

式中，u_i 为正态分布直线上一点的标准化值；$g(u_i)$ 为正态概率密度；$\phi(u_i)$ 为正态分布面积。

小麦产量(y)与绿度(g)的关系

Barnett T L, Thompson D R：Landsat MSS 和 NOAA-6AVHRR 谱数据与小麦产量的大面积关系．Remote Sensing of Environment, 1983, 13

(1) 美国大平原 1978 年冬小麦：

$$y = -2.10 + 1.66g$$

(2) 美国大平原 1979 年春小麦：

$$y = -6.77 + 1.62g$$

氮预算模型

House G J, Stinner B R, Crossley D A et al：传统非耕地农业生态系统中的氮循环——途径和过程分析研究．The Journal of Applied Ecology, 1984, 21

(1) 用 Stinner (1981)修正的方程计算氮从活植物体到枯枝落叶的转移：

$$NF = (UP + FX) - (HG + TF + CS)$$

式中，NF 是氮从植物体到枯枝落叶区室的净流量；UP 是植物对氮的吸收；FX 是大豆固定的氮；HG 是收割作物中的氮；TF 是氮从植物到树冠溶液的流动；CS 是迁移到昆虫消费者中的氮。

(2) 氮从土壤有机质到矿物池的迁移体现了净矿化作用，并且可以用下面 Stinner (1981)修正的关系式计算：

$$MIN = (CR + WE + LO + DN + IM) - (FZ + PR + LT)$$

式中，MIN 是氮的净矿化作用；CR 是农作物对氮的吸收率；WE 是杂草对氮的吸收率；LO 是过滤输出的氮；DN 是反硝化作用输出的氮；IM 是被固定的氮；FZ 是肥料输入的氮；PR 是降水量；LT 是枯枝落叶输入的氮。

水稻的气候土壤生产潜力估算模型

梁荣欣，张瑞雪：水稻的气候土壤生产潜力估算．自然资源，1984, 2

(1) 作物的光合潜力 W_i 模型：

$$W_i = \frac{E}{Z} \cdot Q_i$$

式中，W_i 为第 i 时段内，单位土地面积上的光合潜力；Q_i 为第 i 时段内，投入该面积上的太阳辐射能；E 为作物的最高光能利用率；Z 为能量转换系数。

(2) 作物的光热潜力模型：

$$W = \frac{E}{Z} \sum_i Q_i \cdot L_i \cdot T_i$$

式中，$L_i = \frac{l_i}{L}$，为叶面积订正系数，l_i 为当地作物丰产群体第 i 时段的实际叶面积指数，L 为作物理想群体的最适叶面积指数；$T_i = \frac{t_i}{T}$，为温度订正系数，t_i 为第 i 时段的平均温度，T 为作物光合作用温度。

(3) 作物水肥光热潜力模型：

1) 作物光热水潜力 $\hat{W}$ 模型

$$\hat{W} = \sum_i W_i \cdot L_i \cdot T_i \cdot R_i$$

式中，R_i 为水分订正系数。

2) 作物水肥光热潜力 Y 模型

$$Y = P \cdot \sum_i W_i \cdot L_i \cdot T_i \cdot R_i$$

式中，P 为肥力订正系数。

优先选择比

王长根，张林，龚绍先：对内蒙古地区种植小麦可能性的探讨．自然资源，1984, 2

$$r_{ij} = \frac{D_j}{D_i + D_j}$$
$$r_{ji} = 1 - \frac{D_j}{D_i + D_j}$$
$$D_i = |x_k - x_i|$$
$$D_j = |x_k - x_j|$$

式中，x_k 为固定样本；x_i, x_j 为两个任意样本。

叶片与周围空气的对流热 A 的模型

董振国：农田作物层温度初步研究——以冬小麦、夏玉米为例．生态学报，1984, 4(2)

在自由对流状况下

$$A = 5.86 \times 10^{-3} \left(\frac{T_L - T_a}{D} \right)^{\frac{1}{4}} (T_L - T_a)$$

在强迫对流状况下

$$A = 5.93 \times 10^{-3} \left(\frac{u}{D} \right)^{\frac{1}{2}} (T_L - T_a)$$

式中，T_L, T_a 分别为叶温和气温；u 为风速；D 为叶

片平均宽度

划分农业区的判别函数

张伯祉、黄瑞芳：用逐步判别分析划分农业区的尝试——以淮南地区为例.地理研究，1984，3（4）

设研究地域为一个系统，称为农业生产地域系统它包含 n 个农业区，每个农业区包含若干个农业生产基本单元 x，每个基本单元有 m 个因子(变量)．各母体的分布密度 $f_g(x)$ 均假设服从正态分布

$$f_g(x)=\frac{\left|\sum^{-1}\right|^{\frac{1}{2}}}{(2\pi)^{\frac{N}{2}}}\exp\left[-\frac{1}{2}(x-\mu_g)\sum^{-1}(x-\mu_g)\right]$$

式中，$X=\begin{bmatrix}X_1\\X_2\\\vdots\\X_m\end{bmatrix}$ 是一个 m 维向量；参数 $\mu_g=\begin{bmatrix}\mu_{1g}\\\mu_{2g}\\\vdots\\\mu_{mg}\end{bmatrix}$ 及

$\sum=\begin{bmatrix}\delta_{11}&\delta_{12}&\cdots&\delta_{1m}\\\delta_{21}&\delta_{22}&\cdots&\delta_{21}\\\vdots&\vdots&&\vdots\\\delta_{m1}&\delta_{m2}&\cdots&\delta_{mm}\end{bmatrix}$ 分别是母体的期望向量与协方差矩阵相同．

设有观测样本 $X_{gk}=\begin{bmatrix}X_{1gk}\\X_{2gk}\\\vdots\\X_{mgk}\end{bmatrix}$，　$g=1,2,\cdots,G$，

$K=1,2,\cdots,n$，$\sum_{g=1}^{G}n_g=N$，则判别函数为：

$$y_g(x)=\ln p_g-\frac{1}{2}C'_g\bar{X}_g+C_gX$$

式中，$\bar{X}_g=\begin{bmatrix}X_{1g}\\X_{2g}\\\vdots\\X_{mg}\end{bmatrix}$；$X=\begin{bmatrix}X_1\\X_2\\\vdots\\X_m\end{bmatrix}$；$C_g=S^{-1}\bar{X}_g=\begin{bmatrix}C_{1g}\\C_{2g}\\\vdots\\C_{mg}\end{bmatrix}$．

蝗虫对麦茬地中小麦损害的模拟模型

Hardman J M, Charnetski W A, Mukerji M K．模拟蝗虫对麦茬地中小麦损害的模型．The Journal of Applied Ecology, 1985, 22

（1）蝗虫子模型：

蝗虫种群的密度和年龄结构用一个向量来表示，向量的元素 $a_i(t)$ 表示在时间 t 生活在年龄段 i 中的个体数量

$$a_{i+1}(t+1)=a_i(t)S_i$$

式中，S_i 是从年龄段 i 转换到年龄段 $i+1$ 的个体的比例

在第 t 天，蝗虫毁坏的小麦总量为：

$$H(t)=7.2\sum_{i=1}^{90}a_i(t)e_iD(t)$$

式中，$H(t)$ 是每平方米面积中被毁坏的干物质的毫克数；e_i 是喂养率；$D(t)$ 是在第 t 天累积的温度总量．

（2）小麦子模型：

小麦的生物量 B：

$$B(d+1)=B(d)+c_1c_2b(d)-P(d)$$

式中，下标 d 指当前的生理年龄；c_1 是有效湿度修正因子；c_2 是植物密度；$b(d)$ 是生物量的增加；$P(d)$ 是在第 t 天累积温度总量和植物密度除以在第 t 天被蝗虫毁坏的树叶和茎的重量所得的值．

产量 Y：

$$Y=0.186B_h^{1.36}$$

式中，B_h 是收获生物量．

农业旱涝指标的计算模型

肖嗣荣，郭康：关于农业旱涝指标的研究．地理研究，1985，4(2)

（1）水分平衡公式：

$$W_L+(R+Q)-(P+E+T+U)=W_K$$

式中，W_L，W_K 为某一时期开始和终止时的土壤水分；R 为降水量；Q 为潜水与深层土壤水对作物根系层的补给量；P 为地表径流；E 为土壤增蒸发；T 为作物蒸腾；U 为对地下水的入渗补给．

（2）旱涝指标公式：

$$A=W+R(1-\sigma-S)+Q$$

式中，A 为可利用水；W 为 1m 土层原有易效水；R 为某生长季节降水量；σ 为周期的径流系数；S 为同期的渗透系数；Q 为深层土壤和地下潜水供给的水分

$$K=K/A$$

式中，K 为农业旱涝指标；A 为同期作物需水量．

（3）旱涝简化公式：

1）春季(3～5月或4～5月)：

平原：

$$K=\frac{W+R+Q}{N}$$

坝上——冀北山地冀桑洋河盆地：

$$K=\frac{K}{N}$$

其余山地：

$$K=\frac{W+K}{N}$$

式中，N 为可利用水 A 的同期作物需水量。

2) 初夏(6 月中～7 月上)和伏夏(7 月中～8 月上)：

平原：

$$K=\frac{R(1-S-\sigma)}{N}$$

坝上——冀北山地冀桑洋河盆地：

$$K=\frac{R(1-\sigma)}{N}$$

其余山地

$$K=\frac{R(1-\sigma)}{N}$$

3) 秋季(8 月中～9 月)

平原：

$$K=\frac{W+R(1-S-\sigma)}{N}$$

坝上——冀北山地冀桑洋河盆地：

$$K=\frac{R(1-\sigma)}{N}$$

其余山地：

$$K=\frac{W+R(1-\sigma)}{N}$$

式中，N 为可利用水 A 的同期作物需水量。

粮食作物生产潜力的估算

侯光良，刘允芬：我国气候生产潜力及其分区. 自然资源，1985，3

(1) 光能生产潜力 Y_1 模型：

$$Y_1=0.252\sum Q\times 0.83\frac{L_i}{L_0}\ (\mathrm{kg\cdot hm^{-2}})$$

式中，$\sum Q$ 为单位时间单位面积上所投射的总辐射能；L_0 为最大叶面积系数；L_i 为某一时段的叶面积系数

(2) 光温生产潜力 Y_2 模型：

$$Y_2=0.252\sum Q\times 0.83\frac{L_i}{L_0}f(T)\ (\mathrm{kg\cdot hm^{-2}})$$

$$f(T)=\exp\left[a\left(\frac{T-T_0^2}{2}\right)^2\right]\quad \begin{cases}T\leqslant T_0, & a=-1\\ T>T_0, & a=-2\end{cases}$$

式中，$f(T)$ 为温度订正函数，T_0 为最适温度，T 为实际温度，a 为参数。

(3) 气候生产潜力 Y_3 模型：

$$Y_3=0.252\sum Q\times 0.83\frac{L_i}{L_0}f(T)\frac{0.8R}{ET_0}(\mathrm{kg\cdot hm^{-2}})$$

式中，R 为降水量；ET_0 为土壤水分供给补充条件下的农田可能蒸散量。

农业生态经济系统的投入产出分析模型

邓宏海：农业生态经济系统的投入产出分析. 地理研究，1985，4(4)

(1) 农业生物和农业生态系统的生物生产力：

第 j 种植物在其生产用地 S_j 上的单位面积的年平均净生物产量，即生物生产力向量 $p\left(\frac{X}{S}\right)\eta(m)$：

$$p\left(\frac{X}{S}\right)\eta(m)=\left[\frac{X_1}{S_1},\frac{X_2}{S_2},\cdots,\frac{X_m}{S_m}\right]$$

$$(j=1,\ 2,\ \cdots,\ m)$$

全系统的生物生产力 $P\left(\frac{\sum X}{\sum S}\right)\eta$：

$$P\left(\frac{\sum X}{\sum S}\right)\eta=\frac{\sum_{i=1}^{m}X_i}{\sum_{i=1}^{m}S_i}$$

(2) 农业技术系统的生物生产率和经济生产率：

全系统活劳动的生物生产率：

$$P\left(\frac{\sum X}{\sum S}\right)\eta=\frac{\sum_{i=r}^{k}X_i}{\sum_{f=q-1}^{h}Z_f}$$

全系统活劳动的经济生产率：

$$P\left(\frac{\sum Y}{\sum S}\right)\eta=\frac{\sum_{i=1}^{k}Y_i}{\sum_{f=q+1}^{h}Z_f}$$

(3) 农业生物和农业生态经济系统的经济生产力：

第 j 种植物在其生产用地 S_j 上的单位面积的年平均经济产量，即经济生产力向量 $p\left(\frac{Y}{S}\right)\eta(k)$

$$p\left(\frac{Y}{S}\right)\eta(k)=\left[\frac{Y_1}{S_1},\frac{Y_2}{S_2},\cdots,\frac{Y_m}{S_m}\right]$$

全系统的总体经济生产力 $P\left(\frac{\sum Y}{\sum S}\right)\eta$

$$P\left(\frac{\sum Y}{\sum S}\right)\eta=\frac{\sum_{i=1}^{k}Y_i}{\sum_{j=1}^{k}S_i}$$

虫害动力学的仿真模型

Carruthers R I, Whitfield G H, Tummala R L et al：在洋葱农业生态系统中研究和仿真虫害动力学的系统方法 Ecological Modelling, 1986, 33

为了完成本模型中的发展并转入下一个阶段生活阶段，每一个生活阶段要求在一个临界温度（T_0）之上特定数量的热量积累，单位是℃·d (DD)。

$$DD=\int_0^x \max[0,T(t)-T_0]dt$$

式中，x 表示需要完成一个生活阶段发展的平均日历天数；$T(t)$ 是时间 t 的温度。

(1) 瞬间成熟延迟：

$$T_{DEL}=DD/\max[0,T(t)-T_0]$$

(2) 时间变化的分布式延迟使用 Erlang 密度函数来描述：

$$f(\tau)=\left(\frac{k}{T_{DEL}}\right)^k\tau^{k-1}\exp\left(-\frac{k\tau}{T_{DEL}}\right)/(k-1)!$$

式中，密度函数 $f(\tau)$ 描述了单个种群成员越过分布式延迟过程经过的时间。

牧草产量预报中的综合决策模型

周电辉，罗世杰，祁永坚等：模糊数学在牧草产量预报中的应用 生态学报，1986，6(1)

$$M_V(\cdot,\oplus)=\frac{1}{4}\left(\bigvee_{i=1}^{m}K_1+\bigvee_{i=1}^{m}K_2+\sum_{i=1}^{m}K_1+\sum_{i=1}^{m}K_2\right)$$

农业生产结构最优化方案的线性规划模型

马芬荣，满汉昕，钱翌：农业生态系统结构的线性规划选优探讨．地理研究，1986，5(2)

目标方程式：

$$\max Z=\sum_{j=1}^{17}C_jX_j$$

约束条件：

$$\sum_{j=1}^{17}a_{ij}X_j\geqslant D_i \quad (i=1,2,\cdots,14)$$

$$\sum_{j=1}^{17}a_{ij}X_j=D_i \quad (i=15,16,\cdots,19)$$

$$X_j\geqslant 0 \quad (j=1,2,\cdots,17)$$

式中，X_j 为决策变量。

求某一重现期的极值公式

乔盛西，马乃孚：长江三峡和清江河谷冬暖的成因及其与柑桔生产 地理研究，1986，5(2)

(1) 极大值：

$$X_p=\overline{X}+\lambda_{N\cdot p}\cdot S$$

式中，$\lambda_{N\cdot p}$ 为均离系数，$\lambda_{N\cdot p}=\frac{1}{\sigma_N}[-\ln(-\ln p)-r_N]_0$ 为样本的均值和均方差；$\overline{X}$ 和 S 为样本数。

(2) 极小值：

$$X_p=\overline{X}-\lambda_{N\cdot p}\cdot S$$

(3) 柑桔产量的最大熵谱计算公式：

$$f(\lambda)=\frac{\sigma_{k0}^2}{\left|1-\sum_{j=1}^{k0}\sigma_{k0}^2e^{ij}\lambda\right|^2}$$

式中，$\lambda=2\pi S$，S 为频率；i 为虚数；σ_{k0}^2 为对应于

截止阶的预报误差方差；b_j^{k0} 为过滤系数，其递推公式可表达为：

$$b_1^1 = 2\sum_{i=1}^{n-1} X_i X_{i+1} / \sum_{i=1}^{n-1}\left(X_i^2 + X_{i+1}^2\right)$$

$$b_{k+1}^{k+1} = \frac{2\sum_{j=1}^{n-k-1}\left[\left(X_i - \sum_{j=1}^{k} b_j^k X_{i+j}\right)\left(X_{i+k+1} - \sum_{j=1}^{k} b_j X_{i+k+1-j}\right)\right]}{\sum_{i=1}^{n-1}\left[\left(X_i - \sum_{j=1}^{k} b_j^k\right)^2 + \left(X_{i+k+1} - \sum_{j=1}^{k} b_j^k X_{i+k+1-j}\right)^2\right]}$$

$$(1 \leqslant k \leqslant n-1)$$

$$b_1^2 = b_1^1 - b_2^2 b_1^1$$

$$b_j^{k+1} = b_j^k - b_{k+1}^{k+1} b_{k+1-j}^k \qquad (j = 1,2,\cdots,k)$$

(4) 最优截止阶 k_0 是使赤池最终预报误差准则 (FPE) 最小：

$$(FPE)_k = \sigma_k^2\left[\left(1+\frac{k}{n}\right)\Big/\left(1-\frac{k}{n}\right)\right]$$

式中，$\sigma_k^2 = R(0) - \sum_{j=1}^{k} b_j^k R(j)$，$R(j)$ 为自相关系数。

作物最佳结构研究模型

杨永岐，那守谦，班显秀等：辽宁省主要作物最佳结构研究，自然资源，1986，4

(1) 作物产量的农业气候模式——气候产量 M 模型：

$$M = 0.0598 R_g \cdot \delta \cdot k \cdot a \cdot b \cdot c$$

式中，R_g 为太阳总辐射；δ 为换算系数；k 为收获指数；a，b 和 c 分别为光、温、水订正系数。

(2) 作物气候产量的变异——变异系数 C_v 模型：

$$C_v = \frac{1}{\bar{y}}\sqrt{\frac{1}{n-1}\left[\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - \bar{y})^2\right]}$$

式中，y_i 为实际产量；$\hat{y}_i$ 为动态平均值；$\bar{y}$ 为产量均值。

(3) 作物配置的最优规则——调整系数 L_{ik} 模型：

$$L_{ik} = \frac{M_{ik}}{\overline{M}_{ik}} \cdot \frac{D_{ik}}{\overline{D}_{ik}}$$

式中，$\overline{M}_{ik}$ 为作物产量的面积加权平均值；$\overline{D}_{ik}$ 为稳产度的平均值。

农田水分盈亏量的估算模型

方光迪：三江地区降水与农业，地理学报，1986，41(4)

(1) 农田水分平衡方程：

$$P + I = E_s + T + F + \Delta G + \Delta W$$

式中，P 为降水；I 为灌溉；E_s 为土壤蒸发；T 为作物蒸腾；F 为地表径流量；ΔG 为深层渗漏量；ΔW 为浅层入渗量。

(2) 作物产量对水的反应关系：

$$1 - Y_a / Y_m = K_y(1 - E_a / E_m)$$

式中，Y_a 为作物产量；Y_m 为最大作物产量；K_y 为产量(水分)反应系数；E_a 为农田蒸发量；E_m 为最大农田蒸发量。

预测水应力对臭氧引起农作物减产的响应模型

King D A：预测水应力对臭氧引起的农作物减产的影响的模型 Ecological Modelling, 1987, 35

与一个已知季节蒸腾作用有关的相对产量：

$$Y/Y_p = (ST/ST_p)(TE/TE_p)$$

式中，Y 是生物量积累；ST 是季节蒸腾作用；TE 是蒸腾效率；Y_p，ST_p 和 TE_p 分别表示土壤水或臭氧没有限制时农作物的潜在产量、季节蒸腾作用和作为累积臭氧释放量的函数模拟下降的蒸腾作用的蒸腾效率。

$$F_i = F_{i-1} + kD_i$$

式中，F_i 是第 i 天蒸腾作用下降因子的值；D_i 是每天臭氧的释放量；k 是一个表示蒸腾作用对臭氧剂量敏感度的常数。

$$T / T_0 = 1 - F_i$$

式中，T 是被污染农作物的蒸腾作用；T_0 是没有被污染农作物的蒸腾作用。

臭氧损害减产因子被定义为：

$$\mathrm{ORF} = (T / T_p)^\beta$$

式中，T 是某一天农田中估算的农作物蒸腾作用率；T_p 是没有臭氧时，水分充足的农作物生长时的期望蒸腾作用率；β 表示对臭氧的防护程度，它与由于水应力和以前的臭氧损害引起的蒸腾作用下降有关。

资源替代策略的系统方程

Racsko P：农业生态系统的生产系统中适应性的资源替代策略的稳定性和不稳定性　Ecological Modelling, 1987, 35

$$\frac{dR}{dt}=Q(R)-mR-NV(R)\phi(\overline{\mu})$$

$$\frac{dN}{dt}=\alpha NV(R)\phi(\overline{\mu})-S(N)$$

式中，$R(t)$ 是系统一般单元中在时间 t 的资源量；$N(t)$ 是同一单元中作为资源被测算的产品数量；m 是资源的自然损耗率；$V(R)$ 是用来生产一个单位的产品所需的资源量；α 是转换系数；$Q(R)$ 是控制函数-资源输入流；$S(N)$ 是控制函数-产品输出流；$\phi(\overline{\mu})$ 是表示环境对系统影响的外生参数向量 $\overline{\mu}$ 的纯量函数，$\phi(\overline{\mu})$ 修改了生产过程中资源的使用效率，$0<\phi(\overline{\mu})\leqslant 1$；$\overline{\mu}$ 是环境因子向量，例如天气状况，市场情况等

土地生产潜力指数

郭润光，孙国华：宁夏南部山区发展畜牧业的地理条件分析　自然资源，1987，1

(1) 土地生产指数 x 模型：

$$x=a\cdot w\cdot p\cdot 100$$

式中，a 为某项用地所占总面积的百分数；w 为相应于某项生产所投入的劳动力百分数；p 为产值。

(2) 土地生产指数比 x_i 模型：

$$x_i=\frac{1}{\sum x}\cdot p_i\cdot 100$$

式中，x_i 为 i 项土地生产指数比；$\sum x$ 为各项土地生产指数之和；p_i 为 i 项土地生产指数。

柑橘产量模型

张养才：我国亚热带北区柑桔生产潜力与农业气候资源开发利用探讨　自然资源，1987，2

$$Y=Y_t+Y_W$$

式中，Y 为实际产量；Y_t,Y_W 分别为趋势产量和气象产量

基本农田建设类型分区的分析模型

蒋定生，黄国俊，范兴科：用逐步判别分析对陇东基本农田建设类型分区的探讨　水土保持通报，1987，7(2)

(1) 正态母体的概率密度函数 $f_g(X)$ 模型：

$$f_g(X)=\frac{|S^{-1}|^{\frac{1}{2}}}{(2\pi)^{\frac{m}{2}}}\exp\left[-\frac{1}{2}(X-\overline{X}_g)'\times S^{-1}(X-\overline{X}_g)\right]$$

$$S=(S_{ij})$$

$$S_{ij}=\frac{1}{N-G}\sum_{g=1}^{G}\sum_{k=1}^{n_g}\left(X_{igk}-\overline{X}_{ig}\right)\left(X_{jgk}-\overline{X}_{jg}\right)$$

$$(i,j=1,2,\cdots,m)$$

式中，S^{-1} 为 S 的逆矩阵。

(2) 判别函数 $Y_g(X)$ 模型：

$$Y_g(X)=\ln q_g+C_{0g}+C_{1g}X_1+C_{2g}X_2+\cdots+C_{mg}X_m$$

式中，q_g 为先验概率；C_{ig} 为判别系数。

区域土地质量系数

尹志勇：土地资源与区域农业结构的关系——以秦皇岛市域为例　自然资源学报，1987，2(3)

为了表示区域土地的优劣程度，引入土地质量的概念，并采用区域土地质量系数 Q 作为衡量指标，其具体表达式如下：

$$Q=\frac{1}{S}\sum_{i=1}^{n}\frac{S_i}{i}=\sum_{i=1}^{n}\frac{P_i}{i}\qquad\left(\frac{1}{n}\leqslant Q\leqslant 1\right)$$

式中，S 为区域总面积；i 为 1～n 个土地适宜等级中的第 i 等；S_i 为第 i 等土地所占的面积；P_i 为第 i 等土地的面积百分比例，即 S_i/S。

叶片气孔传导力模型

王宏，杨春虹：小麦气孔传导力和土壤基质势的关系　生态学报，1987，7(3)

$$g_l=\frac{1}{r_s}=\frac{1}{r_d}+\frac{1}{r_b}$$

式中，r_s、r_d 和 r_b 分别为叶片、近轴面和远轴面的气孔阻力。

积温的距离系数

苏州熟制课题研究协作组：用线性规划方法确定苏州市主要农作物布局的最佳方案　自然资源，1987，4

$$d_{i,k}=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{v}\left(x_{ij}-x_{kj}\right)^2}{v}}\qquad(i\neq k;\ i,k=1,2,\cdots,N)$$

式中，x_{ij} 为第 i 块标本 j 个变量的观测值；N 为标本数；v 为变量数。

水资源盐度控制模型

Tyagi N K：通过水资源的综合利用控制盐度. Ecological Modelling, 1988,40

(1) 目标函数：

$$Z=\max\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=1}^{5}PR_{ijk}X_{ijk}$$

$$\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=1}^{5}CSI_kVI_{jk}-\sum_{j=1}^{1}\sum_{k=6}^{6}CSD_kGD_{jk}$$

式中，Z 是目标函数的最大值；X_{ijk} 是季节 j 中使用质量为 k 的水灌溉的农作物的面积；PR_{ijk} 是季节 j 中使用质量为 k 的水灌溉的农作物 i 的收入；VI_{jk} 是季节 j 中释放的质量为 k 的灌溉水的体积；CSI_k 是质量为 k 的灌溉水的成本；GD_{jk} 是季节 j 中抽取的质量为 k 的排放水的体积；CSD_k 是质量为 k 的抽取排放水的成本；i 是一个农作物面积指数，取值为 $1,2,\cdots,n$；j 是一个农作物季节指数，取值为 1 =夏季，2 =冬季；k 是一个水质量指数，1 表示电导率为 0.3 $dS\cdot m^{-1}$ 的沟渠水，2~6 表示电导率为 0.5,2,4,6 和 8 $dS\cdot m^{-1}$ 的地表水.

(2) 系统的约束条件：

1) 水的分配：

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=1}^{5}WR_{ijk}X_{ijk}-\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=1}^{5}VI_{jk}=0$$

$$\frac{ET(1+LR)-ER}{AE}=WR$$

$$DP=WR-ET\ (\text{没有径流的情况})$$

$$LR_{jk}=\frac{CI_{jk}WR_{jk}}{EL\ (2ECE_{jk}-CI_{jk})}$$

式中，WR 是农作物对水的需求；ET 是土壤水分蒸发蒸腾损失总量；ER 是有效降雨量；AE 是利用率；DP 是深层渗透；CI_{jk} 是季节 j 中抽取的质量为 k 的灌溉水的盐度；ECE_{jk} 是季节 j 中农作物根部吸取的质量为 k 的灌溉水在平均饱和状态下的盐度；LR 是维持根部盐分平衡的淋溶需水量；EL 是淋溶率.

2) 根区盐分平衡：

$$CDW_{ijk}>\frac{CWR_{ijk}WR_{ijk}}{WR_{ijk}-ET_{ijk}}$$

式中，CDW_{ijk} 是季节 j 中使用质量为 k 的水灌溉时，流经农作物 i 的根区的排放水可以容许的最大盐度；CWR_{ijk} 是季节 j 中抽取的质量为 k 的灌溉水的盐度

3) 地表水平衡：

$$GMA\leqslant\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=1}^{5}GI_{jk}+\sum_{j=2}^{2}\sum_{k=6}^{6}GD_{jk}-$$

$$\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=1}^{5}RGI_j\cdot VI_{jk}-\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=1}^{5}RCP\cdot X_{ijk}$$

式中，GMA 是开采的地表水；GI_{jk} 是季节 j 中抽取的质量为 k 的地表水的体积；CW 是水供给的沟渠；GD_{jk} 是季节 j 中流出系统的质量为 k 的地表水的体积；RGI 是输送损失的补充因子；RCP 是灌溉利用损失的补充因子.

4) 地表水储存中的盐分平衡：

$$SBC\leqslant\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=1}^{5}SI_k\cdot VI_{jk}+\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=6}^{6}SD_k\cdot CD_k-$$

$$\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=1}^{5}SI_k\cdot RGI\cdot VI_{jk}-\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=1}^{5}SP_kRCP_{ijk}$$

式中，SBC 是地表水库中盐分的减少；SI_k 是质量为 k 的灌溉水在输送中损失的盐分；SP_k 是用质量为 k 的水灌溉的农田中渗入农作物根区的水中的盐分.

5) 土地面积：

$$AL_j>\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=1}^{5}\alpha_{ijk}X_{ijk}$$

式中，AL_j 是季节 j 中被收割的土地；α_{ijk} 是土地利用系数，表示是季节 j 中使用质量为 k 的水灌溉的农作物 i 所占用的土地.

6) 水分有效性：

$$AI_{jk}>\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=1}^{5}VI_{ijk}$$

式中，AI_{jk} 是每个季节中不同质量的有效水.

臭氧与水应力的相互作用模型

King D A, Heagle A S, Flagler R B：大豆的臭氧×水应力相互作用模型的评估. Ecological Modelling, 1988, 41

水应力对臭氧的影响：

当 $\{(T/T_p)^{1.36}[O_3]\}>T_h$

$$D_h-(T/T_p)^{1.36}[O_3]-T_h$$

当 $\{(T/T_p)^{1.36}[O_3]\} < T_h$

$$D_h = 0$$

式中，D_h 是每小时臭氧的剂量；T 是农作物在两种应力作用下的蒸腾作用；T_p 是农作物不受土壤水应力和臭氧影响时的潜在蒸腾作用；T_h 是在任何影响因素起作用之前必定超越的每小时平均阈浓度；$[O_3]$ 是一小时中的平均臭氧浓度. 对于第 $i-1$ 天，T 和 T_p 的值被用来计算第 i 天的 D_h。

喷灌的节水效益模型

沈振荣，张霞芬：初论华北平原发展喷灌的节水效益. 自然资源，1988，1

(1) 喷灌与地面灌用水定额的对比——田间节水效果模型：

$$P = \frac{M_D - M_P}{M_D} \times 100\%$$

式中，M_D 和 M_P 分别为地面灌和喷灌灌溉定额。

(2) 喷灌与地面灌农田净耗水定额对比——蒸发蒸腾量 E 模型：

$$E_P = \frac{R_n' - C'\left[\theta^3(\theta_W - \theta)\right]_P - Q_{sP}}{L\left(1 + 0.66\frac{\theta_W - \theta}{e_W - e}\right)_P}$$

$$E_D = \frac{R_n' - C'\left[\theta^3(\theta_W - \theta)\right]_D - Q_{sD}}{L\left(1 + 0.66\frac{\theta_W - \theta}{e_W - e}\right)_D}$$

式中，R_n' 为农田的净辐射量；C' 为系数；θ 为空气绝对温度；θ_W 为作用面的绝对温度；e 为空气绝对湿度；e_W 为作用面绝对湿度；L 为汽化潜热；Q_s 为农田田面与下层土壤发生的热量交换量；P 和 D 分别表示喷灌和地面灌。

(3) 农田水量平衡的分析——水量平衡方程：

$$H + C + I + U - E - SR - HG - IG - IS - \Delta S = 0$$

式中，H 为小麦全生育期田间降水量；C 为同期外来地表径流量；I 为灌溉定额；U 为同期地下水毛管补给量；E 为同期田间总蒸发量；SR 为同期地表出流量；HG 为同期降水入渗补给量；IG 为灌溉水的入渗回归补给量；IS 为灌溉水的地表回归补给量；ΔS 为作物生长期始末土壤包气带含水量之差值。

(4) 经济效益分析——增值效益费用比 ΔR 模型：

$$\Delta R = \frac{\Delta B - \Delta C}{\Delta K}\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$$

$$\Delta B = B_P - B_D$$

$$\Delta C = C_P - C_D$$

$$\Delta K = K_P - K_D$$

式中，B_P 和 B_D 分别为多年平均喷灌工程系统和地面灌工程系统的工程总效益；C_P 和 C_D 分别为多年平均喷灌工程系统和地面灌工程系统的年运行费用；K_P 和 K_D 分别为喷灌工程系统和地面灌工程系统的总投资；i 为年利率；n 为喷灌系统的分析年数.

作物冠层的蒸腾量估算模型

卢振民，张翼，牛文元：田间作物蒸腾量测算方法研究. 生态学报，1988，8(1)

$$LT = \frac{\Delta R_n(1 - e^{-k \cdot LAI}) + \rho C_p D/r_a}{\Delta + v(1 + k' \cdot r_s/I_{la} \cdot r_a)}$$

式中，T 为作物的蒸腾量；L 为汽化潜热；A 为用于潜热和显热的可利用能；ρ 和 C_p 分别为干空气的密度和比热；v 为干湿球常数；R_n 为冠层上部所接受的净辐射能；I_{la} 为叶面积指数；k 为作物冠层的消光系数；Δ 为饱和水汽压随温度变化的斜率；$r_a = r_{aN} + 6.266(u_z/r_{aN})^{-\frac{1}{3}}$ 为扩散受到的阻力、u_z 为风速，$r_{aN} = \left[\ln\frac{z-d}{z_0}\right]^2/(0.16u_z)$，$z_0$ 为蒸腾面粗糙度、z 为高度，d 为植物高度的函数。

热带作物农业气候条件适宜度分析模型

张汝：云南热区热带作物农业气候条件的适宜度分析. 自然资源，1988，2

(1) 隶属度模型：

$$\mu_T = \begin{cases} 1 & (\overline{T} > 21\,^\circ\mathrm{C}) \\ \dfrac{1}{1 + 0.111(\overline{T} - 21)^2} & (\overline{T} < 21\,^\circ\mathrm{C}) \end{cases}$$

$$\mu_{T_m} = \begin{cases} 1 & (\overline{T}_m > 15\,^\circ\mathrm{C}) \\ \dfrac{1}{1 + 0.111(T_m - 15)^2} & (\overline{T}_m < 15\,^\circ\mathrm{C}) \end{cases}$$

$$\mu_{TAm}=\begin{cases}1 & (T_{Am}\geq 5℃)\\ \dfrac{1}{1+0.04(T_{Am}-5)^2} & (T_{Am}<5℃)\end{cases}$$

$$\mu_R=\begin{cases}1 & (R\geq 15mm)\\ \dfrac{1}{1+0.01(R-15)^2} & (R<15mm)\end{cases}$$

$$\mu_S=\begin{cases}1 & (S\leq 1m\cdot s^{-1})\\ \dfrac{1}{1+0.25(S-1)^2} & (3>S>1m\cdot s^{-1})\\ 0 & (S\geq 3m\cdot s^{-1})\end{cases}$$

$$\mu_I=\begin{cases}1 & (I\geq 20hh)\\ \dfrac{1}{1+0.01(I-20)^2} & (I<20hh)\end{cases}$$

式中，μ_T、μ_{Tm}、μ_{TAm}、μ_R、μ_S和μ_I分别为年平均气温、最冷月均温、极端低温、年降水量、年均风速和年日照时数的隶属度。

(2) 模糊度模型：

$$R(A,B)=\begin{cases}\sqrt{\dfrac{1}{n}\sum_n(\mu_B\mu_A)^2} & (\mu_A<\mu_B)\\ 0 & (\mu_A\geq\mu_B)\end{cases}$$

式中，$R(A,B)$为最适宜生长相对距离模糊度；$\mu_B=1$为最适宜的适宜度；μ_A为各站适宜度。

海河平原农业供水的决策分析模型

刘昌明：海河平原农业供水的决策分析模型 自然资源学报，1988，3(3)

1. 目标函数

$$Z=\max\sum_{i,p}\left(B_{i,p}^n-C_{i,p}^m\right)\frac{1}{\lambda_e}I_{i,p}^nA_{i,p}$$

式中，$A_{i,p}$表示保证率为p的第i种灌溉方式的灌溉面积，$i=1,2,3,4,5$，1为河灌，2为滴灌，3为喷灌，4为引江渠灌，5为管(带)灌，2,3,5属于节水灌溉技术，$p=1,2,3$(1为50%；2为75%；3为95%)；$B_{i,p}^n$表示灌溉方式为i、作物结构为n、在水量保证率p时灌溉供水的增产效益，n为农作物综合项目(小麦、玉米、棉花、谷子等)，$i=1,2,3,4,5$的意义同前，其计算公式为：$B_{i,p}^n=\dfrac{L_paW_{i,p}^{b-1}}{P_n}$，$L_p$为灌溉效益的分摊系数，$P_n$为农产品的单位价格；$W$为灌溉水量，$a$和$b$随$n$而变(这里分析计算中是固定的)；$I_{i,p}^n$表示由$n$中农作物结构和保证率$p$确定的$i$种灌溉方式的灌溉定额，在海河平原取$n=1,2,3,4$(1为小麦，2为玉米，3为棉花，4为谷子)；$C_{i,p}^m$表示保证率为$p$时第$i$种灌溉方式(技术)的年成本，$m$为综合成本项目(设备费、水源工程费和运行费等)，一般取各项目费用之和；λ_e表示农业用水的管理水平，以水的有效利用率为指标。在海河平原，管理水平较低时$\lambda_1=0.35$，管理水平较高时$\lambda_2=0.6$。

2. 约束条件

以下分述约束条件与约束方程：

(1) 供水约束：

首先，总的可供水量应满足区域总体的供需平衡，即：

$$IW_{j,p}=\sum_{j,p}S_{j,p}-D$$

式中，$S_{j,p}$表示保证率为p时第j种供水来源的可供水量。这里$j=1,2,3,4,5,6$(1为山口水库对平原的供水，2为平原水库供水，3为闸、坝、塘的供水，4为地下水提水，5为引黄供水，6为引江渠灌供水)；D为需水量。

其次，各种频率下可供水量都应满足区域总体的供需平衡：

$$I_{11}^nA_{11}+I_{21}^nA_{21}+I_{31}^nA_{31}+I_{41}^nA_{41}\leq IW_{j,1}\quad(P=50\%)$$

$$I_{12}^nA_{12}+I_{22}^nA_{22}+I_{32}^nA_{32}+I_{42}^nA_{42}\leq IW_{j,2}\quad(P=75\%)$$

$$I_{13}^nA_{13}+I_{23}^nA_{23}+I_{33}^nA_{33}+I_{43}^nA_{43}\leq IW_{j,3}\quad(P=95\%)$$

(2) 灌溉面积限制条件：

在不同的灌溉保证率下，各种灌溉技术所灌溉的农田灌溉面积的总和应当等于当地实际有效灌溉面积：

$$A_{11}+A_{21}+A_{31}-A_{41}\leq\eta_1A\quad(P=50\%)$$

$$A_{12}+A_{22}+A_{32}+A_{42}\leq\eta_2A\quad(P=75\%)$$

$$A_{13}+A_{23}+A_{33}+A_{43}\leq\eta_3A\quad(P=95\%)$$

(3) 灌溉方式限制条件：

由于农业生产灌溉技术水平和农业经济条件、自然条件的限制，各种灌溉技术只能在农业灌区的一定范围内实施，因此，各种灌溉技术的灌溉面积(10^4亩)应当是有限制的：

$$1066\leq A_1\leq 3220$$

$$0 \leqslant A_2 \leqslant 4990$$

$$0 \leqslant A_3 \leqslant 4990$$

$$1066 \leqslant A_4 \leqslant 7220$$

(4) 节水灌溉面积关系限制条件

不同的灌溉技术在同等的水量条件下所灌溉的面积大小是不同的，它们之间有一定的对应关系。例如在同等水量条件下，滴灌面积可以是河灌的3倍，但不大于3倍，喷管面积是河灌的2倍，以2倍为限。

$$A_1 - 3A_2 \leqslant 0$$

$$A_1 - 2A_3 \leqslant 0$$

$$A_1 - 0.8A_4 \leqslant 0$$

$$A_1 - 1.42A_5 \leqslant 0$$

$$1.5A_2 - A_3 \geqslant 0$$

$$3.75A_2 - A_4 \geqslant 0$$

$$A_3 - 0.4A_4 \geqslant 0$$

$$A_3 - 0.71A_5 \geqslant 0$$

$$2.24A_2 - A_5 \geqslant 0$$

$$0.56A_4 - A_5 \geqslant 0$$

(5) 非负限制条件：

各种灌溉技术的灌溉面积都应当是正值，至少等于零，出现负值就失去了物理意义，因此有：

$$A_i \geqslant 0 \quad (i = 1,2,3,4,5)$$

在计算时，不同的灌区可以根据当地的实际情况来选择模型参数，使模型的最优解更加接近实际，精度更高。

土地利用最优结构模式

李克煌，秦耀辰：西峡县土地利用最优结构模式的初步研究．自然资源学报，1988，3(3)

(1) 土地利用效益目标函数：

$$\max Z = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j$$

(2) 土地利用系统约束条件：

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x \lesseqgtr b_i \quad (i = 1,2,\cdots,m)$$

$$x_j \geqslant 0 \qquad (j = 1,2,\cdots,n)$$

式中，Z为农业总产值；x_j为决策变量；c_j为x_j的价值系数；a_{ij}为资源消耗系数，b_i为资源的限制量，m和n分别为土地利用系统主要限制因素个数和决策变量个数。

降水评价加权平均方法

张家诚：水分平衡与降水评价．地理研究，1988，7(3)

$$P = \frac{1}{P+m+n} \int_i^p \int_j^m \int_k^n a_i b_j c P_{ijk}$$

式中，i，j，k为第k种作物或产业在其第j个发育期或生产环节在第i个小区域所占的权重；P_{ijk}为其压力值；其余为系数。

农业生产系统的动态模拟模型

余恩德：辉南县农业生产系统的动态模拟．地理研究，1988，7(4)

(1) 农业生产系统模型：

$$D = \{Q, S\}$$

$$Q = (Q_1, Q_2, \cdots, Q_7)$$

式中，为所讨论的全部变量或参数的集合；为变量间正负影响关系集合；为因果关系图；$Q_1, Q_2, \cdots, Q_7$分别表示农、林、牧、副、渔、资金和人口单元集。

(2) 社会效益综合指数：

$$YI(t) = \sum_{i=1}^{5} Y_i Z_i(t)$$

式中，$YI(t)$为时刻社会效益综合指数；$Z_i(t)$为t时刻第i种农产品指数；Y_i为第i种农产品权重。

沟畦灌溉水流运动的数学模拟

路京选，刘植仁，惠士博：沟畦灌溉水流运动数学模拟简介．自然资源，1989，1

(1) 体积平衡模型：

$$V_Z = V_X + V_S$$

或

$$Q \cdot t = \int_0^x Y(s,t) \mathrm{d}s + \int_0^x Z(t - t_s) \mathrm{d}s$$

式中，V_Z为进入沟畦中的总水量；V_X为沟畦中地面蓄水量；V_S为入渗到土壤中的水量；Q为入沟流量；t为灌水时间；$Y(s,t)$为t时刻沿程s点的水流剖面；$Z(t-t_s)$为t时刻s点的入渗剖面；t_s为水流前锋到达s点的时间。

(2) 水流运动方程：

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Z}{\partial t}=0 \\ \frac{1}{g}\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(P+\frac{Q^2}{Ag}\right)=AS_0-D+D_1\cdot A \end{cases}$$

式中，t 为时间坐标；x 为空间坐标；Q 为 (x,t) 点的断面流量；A 为 (x,t) 点的水流横断面面积；Z 为 (x,t) 点单位沟长上的入渗水量；$D=S_f A$，为水力阻力项；$D_1=\frac{V\frac{\partial z}{\partial t}}{2gA}$，为入渗引起的动力项；$S_0$ 为沟底纵坡；$P=\int_0^y B(y-\eta)\mathrm{d}\eta$，为作用在断面上的压力除以单位体积水重 γ；S_f 为水力阻力坡降；B 为 (x,t) 点的水面宽度；y 为 (x,t) 点的水深。

(3) 定解方程模型：

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Z}{\partial t}=0 \\ \frac{\partial y}{\partial x}=S_0-S_f \end{cases}$$

(4) 运动波模型：

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Z}{\partial t}=0 \\ Q=AC\sqrt{RS_0} \end{cases}$$

式中，C 为谢才系数；R 为水力半径；n 为田间糙率。

作物气候生产潜力计算公式

周兆德：海南岛水稻气候生产潜力和人口承载量的估算．自然资源学报，1989，4(1)

$$Y=CL\cdot CH\cdot CT\cdot G\cdot\left[F(0.8+0.01Y_m)Y_0+(1-F)(0.5+0.025Y_m)Y_c\right]$$

式中，Y 为作物气候生产潜力(籽粒，$\mathrm{kg\cdot hm^{-2}}$)；CL 为作物生长和叶面积矫正系数；CH 为干物质生产率矫正系数；CT 为收获指数矫正系数；G 为全生育期天数；$F=(R_{se}-0.5R_s)/0.8R_{se}$ 为生长期中白天里阴天的部分，R_s 为实测辐射量($\mathrm{J\cdot cm^2\cdot d^{-1}}$)，$R_{se}$ 为晴天最大辐射量($\mathrm{J\cdot cm^2\cdot d^{-1}}$)；$Y_m$ 为作物干物质生产率($\mathrm{kg\cdot hm^{-2}\cdot d^{-1}}$)；$Y_c$ 为晴天中的干物质生产率($\mathrm{kg\cdot hm^{-2}\cdot d^{-1}}$)；$Y_0$ 为阴天中的干物质生产率($\mathrm{kg\cdot hm^{-2}\cdot d^{-1}}$)

灰色 GM(1,1)预测模型

周兆德：海南岛水稻气候生产潜力和人口承载量的估算．自然资源学报，1989，4(1)

微分方程：$\frac{\mathrm{d}X_1^{(1)}}{\mathrm{d}t}+aX_1^{(1)}=u^{(1)}$

响应方程：$X^{(1)}(t)=\left(X^{(1)}(0)-\frac{u}{a}\right)e^{-at}+\frac{u}{a}$

式中，$X^{(1)}(t)$ 为原时间序列 $X^{(0)}(t)$(如面积、总产和人口)经一次性累加后的新序列，a、u 为参数，记为 $\left(X^{(1)}(t_i)=\sum_{k=1}^{i}X^{(0)}(t_k)\right)$，$\hat{a}=\begin{bmatrix}a\\u\end{bmatrix}=\left(B^{\mathrm{T}}\cdot B\right)^{-1}\cdot B^{\mathrm{T}}\cdot Y_N$，

B^{T} 为 B 的转置，而 $B=\begin{bmatrix} -\frac{1}{2}\left[X^{(1)}(2)+X^{(1)}(1)\right] & 1 \\ -\frac{1}{2}\left[X^{(1)}(3)+X^{(1)}(2)\right] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}\left[X^{(1)}(n)+X^{(1)}(n-1)\right] & 1 \end{bmatrix}$，

$Y_N=\begin{bmatrix} X^{(0)}(2),X^{(0)}(3),\cdots,X^{(0)}(n) \end{bmatrix}$。

营养元素平衡状况度量模型

秦祖平，徐琪，戴毅：太湖地区两种稻麦轮作制中营养元素的循环．生态学报，1989，9(3)

(1) 养分库的亏盈量模型：

$$B_k=\sum_{i=1}^{m}I_i-\sum_{j=1}^{n}O_j$$

式中，I_i 为某输入途径的养分输入量；O_j 为某输出途径的养分输出量；m 和 n 分别为养分的输入和输出途径数；B_k 为平衡值。

(2) 顺向指标(养分平衡程度)模型：

$$I/O=\sum_{i=1}^{m}I_i\Big/\sum_{j=1}^{n}O_j$$

渔业生产结构的优化模型

尹孟杰：丘冈农区观山村渔业生产结构优化及生态效益分析．生态学报，1989，9(3)

目标函数：

$$M_{axf}=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}C_{ij}X_{ij}$$

$$(i=1,2,3,\cdots,n;\ j=1,2,3,\cdots,m)$$

式中，$m=5$；$n=3$；$C_{ij}X_{ij}$ 为每亩水面的鲜鱼产量。

运动波沟灌数学模型

路京选等：地面灌溉节水技术研究——沟灌水流运动的数值模拟及其应用　自然资源学报,1989，4(4)

(1) 运动波沟灌数学模型的定解方程组：

$$\begin{cases}\dfrac{\partial Q}{\partial x}+\dfrac{\partial A}{\partial t}+\dfrac{\partial Z}{\partial t}=0 & \text{（连续方程）}\\ Q=A\cdot C\sqrt{RS_0} & \text{（均匀流方程）}\end{cases} \tag{1}$$

式中，x 为沿沟长方向的距离(m)；t 为灌水时间(min)；Q 为沟中流量($\mathrm{m^3\cdot min^{-1}}$)；$A$ 为水流横断面面积($\mathrm{m^2}$)；Z 为单位沟长上的累计入渗量($\mathrm{m^3\cdot min^{-1}}$)；$R$ 为水力半径(m)；S_0 为沟底纵坡；C 为谢才系数，可由曼宁公式求得，$C=\dfrac{1}{n}R^{1/6}$；n 为田间灌水沟的粗糙系数。

将谢才系数带入均匀流方程中得：

$$Q=\frac{1}{n}S_0^{\frac{2}{3}}\cdot AR^{\frac{2}{3}} \tag{2}$$

为便于计算，假设：

$$\left(AR^{\frac{2}{3}}\right)^2=\rho_1\cdot A^{\rho_2} \tag{3}$$

式中，ρ_1、ρ_2 均为经验常数。将(3)式代入(2)式后得：

$$Q=\alpha\cdot A^m \tag{4}$$

$$\begin{cases}\alpha=(\rho_1\cdot S_0)^{\frac{1}{2}}/n\\ m=\rho_2/2\end{cases} \tag{5}$$

式中，ρ_1、ρ_2 可以用(3)式拟合田间灌水沟断面求得。方程(1)和(4)即为运动波沟灌数学模型求解计算的定解方程组。

沟灌条件下的入渗是二维非饱和土壤水分运动。通常沟灌数学模型中均采用经验式表示。本模型中采用具有稳定入渗项的考氏入渗式。

$$Z=k\cdot T^{\alpha}+C\cdot T \tag{6}$$

式中，k，α 和 C 均为经验常数；T 为入渗时间(min)；Z 为单位沟长上的累计入渗量($\mathrm{m^3\cdot min^{-1}}$)。

(2) 应用积分法数值求解：

在(δ_t，δ_x)内对连续方程(1)式积分：

$$\int_t^{t+\delta t}\left[\int_x^{x+\delta x}\frac{\partial Q}{\partial x}\mathrm{d}x\right]\mathrm{d}t+\int_x^{x+\delta x}\left[\int_t^{t+\delta t}\frac{\partial A}{\partial t}\mathrm{d}t\right]\mathrm{d}x+\int_x^{x+\delta x}\left[\int_t^{t+\delta t}\frac{\partial Z}{\partial t}\mathrm{d}t\right]\mathrm{d}x=0 \tag{7}$$

采用一阶尤拉积分，上式化为：

$$\begin{aligned}&[\overline{Q}(x+\delta x,t)-\overline{Q}(x,t)]\delta t+\\&[\overline{A}(x,t+\delta t)-\overline{A}(x,t)]\delta x+\\&[\overline{Z}(x,t+\delta t)-\overline{Z}(x,t)]\delta x=0\end{aligned} \tag{8}$$

式中，$\overline{Q}(x+\delta x,t)$ 为 $x+\delta x$ 处在 δt 时段内的平均流量；$\overline{Q}(x,t)$ 为 x 处在 δt 时段内的平均流量；$\overline{A}(x,t+\delta t)$ 为 $t+\delta t$ 时刻 δx 区间内的平均水流断面积；$\overline{A}(x,t)$ 为 t 时刻 δx 区间内的平均水流断面积；$\overline{Z}(x,t+\delta t)$ 为 $t+\delta t$ 时刻 δx 区间内的平均单位沟长上的入渗量；$\overline{Z}(x,t)$ 为 t 时刻 δx 区间内的平均单位沟长上的入渗量。

很明显，上式反映了 δt 时段内 δx 区间的水量平衡关系式。对任一内单元 $LRJM$，上式可以写成：

$$\begin{aligned}&\{[\theta\cdot Q_R+(1-\theta)Q_M]-[\theta\cdot Q_L+(1-\theta)Q_J]\}\delta t+\\&\{[\phi\cdot A_L+(1-\phi)A_R]-[\phi\cdot A_J+(1-\phi)A_M]\}\delta x+\\&\{[\phi\cdot Z_L+(1-\phi)Z_R]-[\phi\cdot Z_J+(1-\phi)Z_M]\}\delta x=0\end{aligned} \tag{9}$$

式中，θ 和 ϕ 分别为时空加权平均系数。将均匀流公式(4)代入上式并简化整理可得：

$$A_R^m+C_1A_R+C_2=0 \tag{10}$$

$$\begin{cases}C_1=\dfrac{1-\phi}{\theta\alpha}\dfrac{\partial x}{\partial t}\\ C_2=-A_L^m+\dfrac{1-\theta}{\theta}\cdot\left(A_M^m-A_J^m\right)+\\ \qquad\dfrac{\phi}{\theta\alpha}(A_L+Z_L-A_J-Z_J)\cdot\\ \qquad\dfrac{\partial x}{\partial t}+C_1(Z_R-A_M-Z_M)\end{cases} \tag{11}$$

干旱和半干旱地区农田灌溉的规划模型

毛通龙：用规划方法安排干旱和半干旱地区的农田灌溉方案 自然资源学报，1989，4(4)

1. 目标函数

$$\max Z = C_1x_1 + C_2x_2 + \cdots + C_{15}x_{15} = \sum_j C_jx_j$$

式中，C_j 为第 j 个处理量的产量；x_j 为第 j 个处理的灌溉面积。

2. 约束条件

使上面的目标函数达到最大，应满足以下约束条件。

(1) 各时段各灌水处理的灌溉面积之和不能超过该时段灌溉系统的灌溉能力。即：

$$\sum_j X_{ij} \leqslant b_i \quad (i = 1,2,3,4)$$

式中，b_i 为第 i 个时段灌溉系统的灌溉能力；X_{ij} 为第 j 个处理在第 i 个时段的灌溉面积。

为了使求得最优灌溉方案便于在本地区各灌溉系统下推广应用，这里以灌溉系统能保浇的(灌 4 次水：起身、拔节、抽穗、乳熟)的面积为 100 确定参数 b_i，求最优解与保浇面积的百分比。对于 2，3，4 时段，由于灌水时间与饱浇地的灌水时间相对应，且 3 个时段的时间长度相同，所以，这 3 个时段灌溉系统的灌溉能力应等于其保浇面积，即：

$$b_2 = b_3 = b_4 = 100$$

对于第 1 时段，灌水的时间长度是后三个时段的 2 倍，所以，b_1 应是 b_2 等的 2 倍，即 $b_1 = 200$。这样对照各时段的灌水处理，可得约束条件为：

$$x_1 + x_5 + x_6 + x_7 + x_{11} + x_{12} + x_{14} - x_{15} \leqslant 200$$

$$x_2 + x_5 + x_8 + x_9 + x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{15} \leqslant 100$$

$$x_3 + x_6 + x_8 + x_{10} + x_{11} + x_{13} + x_{14} + x_{15} \leqslant 100$$

$$x_4 + x_7 + x_9 + x_{10} + x_{12} + x_{13} + x_{14} - x_{15} \leqslant 100$$

(2) 灌溉面积不能无限地扩大：

由于耕地面积的限制或其他原因，灌溉面积应有一定限制。即：

$$\sum_j X_j \leqslant b_5$$

式中，b_5 的取值各灌溉系统可能有所不同。但在设保浇面积为 100 时，b_5 应是一个与保浇面积相比的相对数。这样，各灌溉系统中 b_5 的取值差异不会太大。这里，从宏观上考虑 b_5 的取值。目前该地区水浇地面积占耕地面积的 40%左右，3/4 的耕地为冬小麦，所以，在设保浇地面积为 100 时，新灌溉方案下的灌溉面积最大可扩大为 $100/40\% \times 3/4 \approx 188$ 亩，即 $b_5 = 188$。于是有：$x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_{15} \leqslant 188$。

3. 归结为模型

由上面的目标函数和约束条件，可得本规划问题的模型为：

$$\max Z = 220.5x_1 + 220.5x_2 + 231.5x_3 + \cdots + 403.2x_{11} + \cdots + 450.0x_{15}$$

$$x_1 + x_5 + x_6 + x_7 + x_{11} + x_{12} - x_{14} + x_{15} \leqslant 200$$

$$x_2 + x_5 + x_8 + x_9 + x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{15} \leqslant 100$$

$$x_3 + x_6 + x_8 + x_{10} + x_{11} + x_{13} + x_{14} + x_{15} \leqslant 100$$

$$x_4 + x_7 + x_9 + x_{10} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} \leqslant 100$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_{10} + \cdots + x_{15} \leqslant 188$$

$$x_j \geqslant 0 \qquad (j = 1,2,\cdots,15)$$

海南岛热带作物多目标规划模型

周兆德、郑剑非：海南岛热带作物多目标规划模型。地理学报，1989，44(4)

(1) 模糊区划模型：

$$\begin{cases} S_j = \sum_{i=1}^{5} r_{ij} \\ r_{ij} = \begin{cases} r_{ij}^* & (r_{ij} \geqslant S_j) \\ r_{ij} & (r_{ij} < S_j) \end{cases} \end{cases}$$

$$r_{ij} = \sqrt{\frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m}[\underset{\sim}{\mu}(x_{jk}) - \underset{\sim}{\mu}(x_{ik})]^2}$$

对于正贡献因子$(x_1 \sim x_6)$：

$$\underset{\sim}{\mu}(x_i) = \begin{cases} 1 & (x_i \geqslant x_{i\max}) \\ \dfrac{x_i - x_{i\min}}{x_{i\max} - x_{i\min}} & (x_{i\min} < x_i < x_{i\max}) \\ 0 & (x_i \leqslant x_{i\min}) \end{cases}$$

对于负贡献因子$(x_7 \sim x_{10})$：

$$\mu(x_i)=\begin{cases}0 & (x_i \geq x_{i\max}) \\ \dfrac{x_{i\max}-x_i}{x_{i\max}-x_{i\min}} & (x_{i\min}<x_i<x_{i\max}) \\ 1 & (x_i \leq x_{i\min})\end{cases}$$

式中，x_1 为年日照时数；x_2 为年均温度；x_3 为≥10℃的积温；x_4 为最冷月均温；x_5 为年极端低温；x_6 为年雨量；x_7 为年干燥度；x_8 为年均风速；x_9 为≥6 级大风年均次数；x_{10} 为年最长旱期。

(2) 多目标规划模型：

$$\begin{cases}\Sigma a_{ij}x_j+d_i^- - d_i^+ = b_i & (i=1,2,\cdots,9,\ j=1,2,\cdots,8) \\ x_j, d_i^-, d_i^+ \geq 0 & (\text{至少有一个正(负)偏差为零}) \\ Z=\Sigma P_i d_i^{+(-)}=\min\end{cases}$$

式中，x_j 为决策变量(作物面积)；d_i^-、d_i^+ 为约束方程的正负偏差；b_i 为约束方程的上(下)界；a_{ij} 为对应决策变量的系数；P_i 为表示目标重要程度的序参数。

第一性生产潜力估算

刘立华：关中地区土地生产潜力和土地人口承载量. 地理研究, 1989, 8(4)

(1) 光合生产潜力计算公式：

$$Yp=\frac{666.7\times10^4}{C\times1000}F\cdot E\cdot Q$$

式中，Yp 为光合生产潜力；C 为能量转换系数；Q 为全年太阳总辐射；F 为光能利用率；E 为经济系数。

(2) 光温生产潜力计算公式：

$$P_t=Y_p\cdot f(T)$$

式中，P_t 为光温潜力；$f(T)$ 为温度衰减函数。

(3) 光温水潜力计算公式：

$$P_a=Y_p\cdot f(T)\cdot f(W)=P_t\cdot f(W)$$

式中，P_a 为光温水潜力；$f(W)$ 为水分衰减函数。

土地生产潜力评价模型

杨子生：四川西昌市土地生产潜力评价的探讨. 自然资源, 1989, 6

(1) 宜垦土地潜力 Y_L 模型：

$$Y_L=Y_C\cdot f(s)$$

$$Y_C=Y_T\cdot f(W)$$

$$Y_T=Y_P\cdot f(T)$$

$$Y_P=6.67\times10^3 r\cdot p\cdot Q_g/\delta$$

式中，Y_C、Y_T 和 Y_P 分别为气候潜力、光温潜力和光合潜力；$f(s)$、$f(W)$ 和 $f(T)$ 分别为土壤养分订正系数、水分对光温潜力订正系数和温度对光合潜力订正系数；δ 为能量转化系数；r 为黄乘维系数；p 为经济系数；Q_g 为光合有效辐射。

(2) 宜林土地潜力 P_L 模型：

$$P_L=P_C\cdot f(s)$$

式中，P_C 为气候性森林生产力。

粮食作物水分盈亏分析模型

杨勤业，吕昌河：西藏自治区主要粮食作物水分盈亏分析. 自然资源, 1990, 1

(1) 农田蒸发力 ET_0 模型：

$$ET_0=WR_n+(1-W)E_a$$

式中，W 为加权系数；E_a 为空气干燥力；R_n 为净辐射。

(2) 作物最大需水量 ET_m 模型：

$$ET_m=K_c\cdot ET_0$$

式中，K_c 为作物栽培系数。

(3) 农田水分盈亏量 B 模型：

$$B=P-ET_m$$

人-粮-地关系的中环公式

巨仁，郭枝国：用人-地关系中环公式对固原县人口增长与粮食生产的分析. 水土保持通报, 1990, 10(1)

$$M_C=P_CU_C$$

$$M_P=A_PU_P$$

式中，M_C 为人口对粮食消费所需求的总量；P_C 为消费粮食的总人口；U_C 为单个人对粮食的消费量；M_P 为土地可能生产粮食的总量；A_P 为土地生产粮食的总面积；U_P 为单位土地面积生产的粮食量。

价值函数 $V(y)$

程积民，张文军：黄土高原地区草场效益多目标评价. 水土保持通报, 1990, 10(3)

$$V(y)=\sum_{i=1}^{n}R_iV_i(yi)\qquad(i=1,2,\cdots,n)$$

式中，$V_i(yi)$ 为第 i 个属性的价值函数；R_i 为标度常数

灰色预测模型

祝建民：双向转换的系统结构调控方法与半干旱地区的农作物布局. 生态学杂志，1990，9(3)

$$\hat{X}_t^{(1)}=\left[X_0^{(1)}-\frac{u}{a}\right]e^{-at}+\frac{u}{a}$$

式中，$\hat{X}_t^{(1)}$ 为未来 t 时刻的预测值；$X_0^{(1)}$ 为预测所用数据的初始值；a 和 u 为灰色参数。

小流域水土保持优化模型

温足：小流域水土保持优化模式探讨. 水土保持通报，1990，10(4)

(1) 约束条件模型：

$$\begin{cases}\sum\limits_{j=1}^{n}a_{ij}x_j\leqslant b_i \quad (\text{或}\geqslant b_i),\quad (j=1,2,\cdots,n)\\ x_i\geqslant 0\end{cases}$$

(2) 目标函数模型：

$$\max F(x)=\sum\lambda_n f_n(x)$$

式中，x_j 为决策变量；a_i 为约束条件中决策变量系数；b 为资源限制量；$F(x)$ 为综合目标函数；λ_n 为决策目标相应的权系数；$f(x)$ 为各目标在单目标情况下的目标值。

干旱缺水条件下麦田蒸散量的计算方法

康绍忠，熊运章：干旱缺水条件下麦田蒸散量的计算方法. 地理学报，1990,45(4)

(1) 麦田蒸散量数学方程：

$$ET_a=\begin{cases}(aI_{la}+b)E_0 & (\bar{\theta}_a\geqslant\theta_j)\\ (aI_{la}+b)\left(\dfrac{\bar{\theta}_a-\theta_{wp}}{\theta_j-\theta_{wp}}\right)^d E_0 & (\bar{\theta}_a<\theta_j)\end{cases}$$

式中，E_0 为蒸发力；a 和 b 为由实测资料回归求得的经验系数,随作物品种和种类而变化；I_{la} 为叶面积指数；$\bar{\theta}_a$ 为计算时段内的平均土壤含水量；θ_{wp} 为凋萎含水量；θ_j 为临界土壤含水量；c 和 d 为由实测资料确定的经验系数,它们随作物生育阶段和土壤条件而变化。

(2) 缺水条件下麦田蒸散量的数学模型：

$$ET_a=(\theta_0-\theta_{wp})-\left[(\theta_0-\theta_{wp})^{1-d}-\frac{(1-d)\cdot(a\cdot I_{la}+b)\cdot E_0 t}{(\theta_j-\theta_{wp})^d}\right]^{\frac{1}{1-d}}$$

式中，θ_0，θ_{wp} 和 θ_j 均指 10cm 土层内的储水毫米数；E_0 指计算时段内的日平均蒸发力毫米数；ET_a 指计算时段内麦田累积蒸散量毫米数；t 为时间变量。

(3) 计算蒸发力的彭曼公式：

$$E_0=\frac{\dfrac{P_0}{P}\cdot\dfrac{\Delta}{\gamma}+0.26(e_s-e_a)(0.5+c'u_2)}{\dfrac{P_0}{P}\cdot\dfrac{\Delta}{\gamma}+1.0}$$

$$A=0.95Q_A\left(a'+b'\cdot\frac{n}{N}\right)-\sigma T_K^4(0.56-0.079)\sqrt{e_a}\left(0.1+0.9\frac{n}{N}\right)$$

式中，E_0 为蒸发力($mm\cdot d^{-1}$)；P_0 为海平面气压(10^2Pa)；P 为计算站的实际气压(10^2Pa)；Δ 为饱和水汽压与温度曲线上在温度等于气温时的斜率 $10^2Pa\cdot ℃^{-1}$；γ 为温度计常数(取值 0.66)；Q_A 为理论太阳辐射(以蒸发水层毫米计)；n 为实际日照时数；N 为理论日照时数；σT_K^4 为绝对黑体辐射(蒸发当量毫米数，σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数(其值为 $2.01\times10^{-9}mm\cdot ℃^{-4}\cdot b'$)，$T_K$ 为绝对湿度($T_K=273+t$)；e_a 为实际水汽压(10^2Pa)；e_s 为饱和水汽压(10^2Pa)；u_2 为离地面 2m 高处的风速($m\cdot s^{-1}$)；c' 为风速修正系数；a' 和 b' 为由日照比率($n\cdot N^{-1}$)估算太阳辐射的经验系数。

充分灌溉条件下的作物最大产量 Y_{me}

侯光良，陈沈斌：根据瓦赫宁根方法估算黄土高原地区一些主要作物最大产量. 自然资源,1990，4

$$Y_{me}=K\cdot CH\cdot CT\cdot G\cdot Y_0\frac{ET_m}{e_a-e_d}$$

式中，K 为产量反应系数；CH 为收获系数；CT 为温度校正系数；G 为全生育期天数；ET_m 为平均日最大蒸散量；Y_0 为标准作物干物质产量。

农田水量平衡方程

张孝中，韩仕峰，李玉山：黄土高原南部农田水量平衡分析研究. 水土保持通报，1990，10(6)

$$\Delta G = P - (E_P + E_S)$$

式中，ΔG 为农田水量平衡值；P 为降雨量；E_P 为作物蒸腾量；E_S 为土壤蒸发量

作物生长与水分利用率的计算模型

赵艺学，杨淑婷，李洪建等：糜子生育期土壤水分变化规律的研究．水土保持通报，1990，10(6)

（1）作物生长期水量平衡模型：

$$E = P + (W_1 - W_2) + C - R - I$$

式中，E 为作物生长期的耗水量；P 为作物生长期的降水量；W_1、W_2 分别为播前、收后土壤储水量；C 为作物生长期通过毛细管作用的水量；R 为作物生长期的地表径流量；I 为作物生长期土壤水补给地下水的水量

（2）水分利用效率模型：

$$q = E \cdot y^{-1}$$

式中，q 为作物水分利用效率；y 为作物产量．

立地对主要造林树种的宜度评判模型

王000夫、马立农、李明发：荆州地区荒山资源研究方法与利用途径探讨．自然资源，1991，1

$$S_j = S_j^a + (X_j - X_j^a)(S_j^b - S_j^a)(X_j^b - X_j^a)^{-1}$$

式中，S_j 为 X_j 对特定树种的宜度；S_j^a，S_j 和 S_j^b 为对应于 X_j^a，X_j 和 X_j^b 的树种宜度；S_j^a，S_j^b，X_j^a 和 X_j^b 为外部给定的宜度参数；$j = 1,2,\cdots,m$，表示 $m-1$ 个立地生态因子，$X_j^a \leqslant X_j \leqslant X_j^b$，表示 j 生态因子的 3 个连续反应值。

长白山区人参高产栽培模型

马树庆，梁洪海：长白山区人参栽培气候生态适应性及其分布的研究．自然资源学报，1991，6(1)

$$\mu(T) = \begin{cases} 0 & (T > 10°C, T < 0°C) \\ 1 - \left|\dfrac{T - T^0}{6}\right| & (10°C > T > 0°C) \end{cases}$$

$$\mu(T_G) = \begin{cases} 0 & (T_G > 28°C, T_G < 13°C) \\ 1 - \left|\dfrac{T_G - T_{G0}}{6}\right| & (13°C \leqslant T \leqslant 28°C) \end{cases}$$

$$\mu(R) = \begin{cases} 0 & (R > 1400\text{mm}, R < 300\text{mm}) \\ \exp\left[-\left(\dfrac{R - R_0}{320}\right)^2\right] & (300\text{mm} \leqslant T \leqslant 1400\text{mm}) \end{cases}$$

$$\mu(P) = \begin{cases} 0 & (P \leqslant 40\%) \\ \exp\left[-\left(\dfrac{P - P_0}{7}\right)^2\right] & (40\% < P < 100\%) \end{cases}$$

$$\mu(D) = \begin{cases} 0 & (D < 85\text{d}) \\ \dfrac{1}{1 + 0.00073(D - 145)^2} & (85\text{d} \leqslant D \leqslant 145\text{d}) \\ 1 & (D > 145\text{d}) \end{cases}$$

式中，当 $0 \leqslant \mu(x_i) \leqslant 1$，其几何图形：$\mu(T)$、$\mu(T_G)$ 为三角形，$\mu(R)$，$\mu(P)$ 为正态型，$\mu(D)$ 为戒下型。根据长白山区 30 个气象站气象要素的多年平均值(1955~1986)，计算了各要素的隶属度，并对其求平均，得到人参栽培综合气候生态资源适宜度(μ)：

$$\mu = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\mu(x_i)$$

农作物水分平衡简化模型

Lhomme J P, Katerji N：农业气象应用中的农作物水分平衡简化模型．Ecological Modelling, 1991, 57

（1）土壤有效水分：

如果 $D \in [D_1, D_2]$，则：

$$MAM(D) = MAM_n + (MAM_x - MAM_n)(D - D_1)/\text{DU}_1$$

如果 $D \in [D_2, D_4]$，则：

$$MAM(D) = MAM_x$$

如果 $D \in [D_4, D_1]$，则：

$$MAM(D) - MAM_n$$

式中，MAM 是最大有效水分，对于一年生农作物，MAM 在最小值 MAM_n 和最大值 MAM_x 之间变化，当农作物发芽时有最小值 MAM_n，而当根达到最大深度时有最大值 MAM_x；D 是在发芽期 D_1 和相应日子之间的天数；DU_1 是在发芽期 D_1 和土壤表面被植物完全覆盖的日子 D_2 之间的天数；D_4 是收获期。

建立在以天为单位的基础上的水分输入和输出方程：

$$AM(D)-AM(D-1)=\sum WS(D)-\sum WL(D)+\delta MAM(D)$$

式中，AM 是有效水分；$\sum WS(D)$ 是在第 D 天土壤的水分供应总量；$\sum WL(D)$ 是同一天中土壤水分损失总量；$AM(D)$ 是在第 D 天结束时的储量状态；$\delta MAM(D)=MAM(D)-MAM(D-1)$。

(2) 水分供给——有效雨量的计算公式：

$$\sum WS=(PR+IR)-(RO+DR)$$

式中，PR 是降水量；IR 是灌溉量；RO 是流失量；DR 是下渗量。

如果 $PR(D)>P_0$，则：

$$RO(D)=\beta[PR(D)-P_0]$$

如果 $PR(D)\leqslant P_0$，则：

$$RO(D)=0$$

式中，系数 β 和 P_0 是两个参数；

$$RC(D)=MAM(D)-AM(D)$$

式中，$RC(D)$ 是第 D 天的保持力。

如果 $PR(D)\leqslant RC(D)$，则：

$$DR(D)=0$$

如果 $PR(D)>RC(D)$，则：

$$DR(D)=PR(D)-RC(D)$$

(3) 水分损失——土壤水分蒸发蒸腾损失总量的计算公式：

如果 $D\in[D_1,D_2]$，则：

$$ET_m(D)/ET_c(D)=k_1+(k_2-k_1)(D-D_1)/DU_1$$

如果 $D\in[D_2,D_3]$，则：

$$ET_m(D)/ET_c(D)=k_2$$

如果 $D\in[D_3,D_4]$，则：

$$ET_m(D)/ET_c(D)=k_2+(k_3-k_2)(D-D_3)/DU_3$$

式中，ET 是实际土壤水分蒸发蒸腾损失总量；ET_m 是最大土壤水分蒸发蒸腾损失总量；ET_c 是气候引起的土壤水分蒸发蒸腾损失总量；DU_3 是成熟期的天数；D_3 是繁殖期结束的日子。

如果 $AM(D-1)\geqslant DAM(D-1)$，则：

$$ET(D)=ET_m(D)$$

如果 $AM(D-1)<DAM(D-1)$，则：

$$ET(D)=ET_m(D)AM(D-1)/DAM(D-1)$$

式中，DAM 表示可用量在逐渐减少。

农业气候指数

姜路明：福建省中亚热带农业气候系统功能评价的数学模型．自然资源，1991，1

(1) 单项资源指数：

$$S_R=\sum_{i=1}^{4}\mu(x_i)a_i$$

$$S_S=\sum_{i=5}^{7}\mu(x_i)a_i$$

$$S_G=\mu(x_8)a_8$$

式中，S_R，S_S 和 S_G 分别为热量、水分和光照三项资源指数；$\mu(x_i)$ 为气候适宜度；a_i 为指标权重。

(2) 总资源指数 C_r：

$$C_r=S_R\cdot A_1+S_S\cdot A_2+S_G\cdot A_3$$

(3) 效能指数 C_e：

$$C_e=S_R\wedge S_S\wedge S_G$$

(3) 利用系数 K：

$$K=C_e/C_r$$

式中，A_1 为 S_R 的指标权重；A_2 为 S_S 的指标权重；A_3 为 S_G 的指标权重。

农业自然生产潜力模型

沈思渊，房承富：淮北涡河流域农业自然生产潜力模型与分析．自然资源学报，1991，6(1)

$$P_a=P_f\cdot f(T)\cdot f(W)\cdot f(S)$$

式中，P_a 为农业自然生产潜力；P_f，$f(T)$，$f(W)$ 和 $f(S)$ 分别代表光合作用、温度、水分、土壤条件对农业自然生产潜力影响的函数。

(1) 光合作用模型与光合生产潜力：

$$P_f=\frac{EQ}{Z(1-C)}\cdot I_H$$

式中，Z 为能量转换系数(冬小麦 $17.79\mathrm{kJ\cdot g^{-1}}$，夏玉米 $17.04\mathrm{kJ\cdot g^{-1}}$，水稻 $16.74\mathrm{kJ\cdot g^{-1}}$)；$C$ 是作物的灰分

率，取0.08；I_H为收获指数，即干物质中子粒产量，或称经济系数，即经济产量与生物产量之比，据研究小麦、水稻为0.35，玉米为0.3；E为作物的光能利用率；Q为太阳总辐射能

$$EQ = \eta \cdot a \cdot (1-\rho) \cdot \phi \cdot \gamma \cdot (1-\omega) \cdot Q$$

式中，η是光合有效辐射占太阳总辐射的比率；a是经叶面反射(反射率α)和漏射(漏射率β)后被作物吸收的光合有效辐射(吸收率)，即$a = 1-(\alpha+\beta)$；ρ是被非光合器官无效吸收的辐射(无效吸收率)；γ是光饱和限制率；ϕ是光合作用的效率(量子效率)；ω是通过呼吸消耗的光和产物(耗损率)。

依据前人在黄淮海平原研究得到的数据，光合潜力模型最终为：

$$P_f = P_{f1} + P_{f2} = 6.344 \times 10^{-1} \times$$

$$\gamma \sum_i \frac{L_i}{L_m} Q_i + 3.672 \times 10^{-1} \sum_i \frac{L_j}{L_j} Q_j$$

该模型输出结果的单位是$kg \cdot hm^{-2}$。

(2) 温度影响函数与光温潜力：

$$f_1(T) = \begin{cases} 0 & (t < 0°C) \\ t/20 & (0°C < t < 20°C) \\ 1 & (t > 20°C) \end{cases}$$

而喜温作物的生物学下限温度为6℃，最适温度大于30℃。对玉米生长率与最大生长率比值和温度的关系进行分析后，可得温度影响函数为：

$$f_1(T) = \begin{cases} 0.027t - 0.162 & (6°C \leqslant t < 21°C) \\ 0.086t - 1.41 & (21°C \leqslant t < 28°C) \\ 1 & (28°C \leqslant t < 32°C) \\ -0.083t + 3.67 & (32°C \leqslant t < 44°C) \\ 0 & (t < 6°C\text{或}t > 20°C) \end{cases}$$

式中，t均为平均气温。

最终得到的光温生产潜力模型表达式为：

$$P_t = P_f f(T_i) = P_{f1} f_1(T_1) + P_{f2} f_2(T_2)$$

式中，各符号意义与前面各式相同。

(3) 水分影响函数与气候生物潜力：

作物产量与蒸散量之间存在一定的比例关系：

$$Y/Y_0 = K \frac{ET}{ET_0}$$

式中，Y和Y_0分别为作物实际产量和在水分供给充足下的潜在最高产量；ET和ET_0分别为农田实际蒸散量和水分充足下的可能蒸散量；K是由作物和地区而定的比例系数。

如果设$Y_0 = P_t$，则$Y = P_w$，即光温水生产潜力，或称气候生物潜力，并可得：

$$P_w = K \frac{ET}{ET_0} \cdot P_t = f(W) \cdot P_t$$

式中，$f(W) = K \frac{ET}{ET_0}$是水分影响函数

在综合考虑了前人研究结果值、黄淮海平原的小麦种植实验结果值，在分阶段计算水分影响函数后，就可得光温水潜力：

$$P_w = P_t \cdot f(W) = P_{t1} \frac{3.7ET_1}{\sum L_i E_{oi}} + P_{t2} \frac{4.5ET_2}{\sum L_j E_{oj}}$$

式中，E_{oi}，L_i分别为i阶段水面蒸发量和作物叶面积指数。

(4) 土壤肥力函数与农业自然生产潜力：

$$I_s = \min(Z \cdot T \cdot B \cdot O_m \cdot H \cdot E_c \cdot N_\mu)$$

式中，各指数用近似的特征函数来表示，Z是土壤剖面指数，且有$Z = \begin{cases} 1 & (d > 100) \\ d/100 & (30 < d \leqslant 100) \\ 0.1 & (d < 30) \end{cases}$，$d$是剖面中障碍层的深度(cm)；$B$是土壤耕层结构指数：$B = 1.4 - (D_b/2.70)$，$D_b$是土壤容重；$T$是表土质地指数，且有$T = \begin{cases} C/40 & (C \leqslant 100) \\ 2 - C/40 & (C > 40) \end{cases}$，$C$是土壤中小于0.01mm颗粒的含量；$O_m$是土壤有机质指数，且有$O_m = \frac{OM \times 10}{clay}$，$OM$是土壤有机质含量，$clay$是土壤中小于0.001mm黏粒的含量；$H$是土壤酸碱度指数，且有$H = \begin{cases} 1 & (6.5 \leqslant pH \leqslant 8) \\ \frac{1}{pH-7} & (pH > 8) \end{cases}$，即根据土壤实测的pH值计算；$E_c$是土壤代换量指数，且有$E_c = \begin{cases} 1 & (CEC > 25) \\ 0.75 + \frac{CEC}{100} & (CEC < 25) \end{cases}$，$CEC$是土壤阳离子

代换量；N_μ 是土壤养分指数，且有

$$N_\mu=\begin{cases}\frac{1}{3}\left(\frac{TN}{0.2}+\frac{TP}{0.1}+\frac{TK}{2}\right) & (TN\leqslant 0.2, TP\leqslant 0.1, TK\leqslant 2)\\ 1 & (TN>0.2, TP>0.1, TK>2)\end{cases}$$

TN、TP 和 TK 分别是土壤全氮、全磷和全钾含量。如果出现 $TN>0.2$，$TP>0.1$ 或者 $TK>2$，则取各自相应项的值为 1，即该养分已不是限制因素。根据最低因子律，生产潜力就由其他养分因子所决定。

冬小麦生产力估算模型

关连海，韩湘玲：冬小麦生产力估算方法研究 自然资源学报，1991，6(1)

(1) 小麦的光温生产潜力：

$$P_m=\begin{cases}0.0131T^{1.5533}(35-T)^{1.1235} & (0°C<T<35°C)\\ 0 & (T\leqslant 0°C或T\geqslant 35°C)\end{cases}$$

(2) 养分与作物生产力：

土壤肥力与基础生产力的关系式：

$$TF=\begin{cases}2.089N+2.4656P-0.00363NP & (P, N\neq 0)\\ 0 & (P=0或N=0)\end{cases}$$

式中，N 和 P 分别为土壤中的碱解氮、速效磷含量，单位为 μg/g；TF 为基础生产力，单位为 $kg\cdot hm^{-2}$。

N 肥投入量与生产力的关系曲线方程：

$$YN=a+(A-a)\times[1-\exp(ct)]$$

式中，YN 为由 N 肥决定的小麦生产力($kg\cdot hm^{-2}$)；a 为有土壤肥力所形成的基础生产力($kg\cdot hm^{-2}$)；A 为在气候、土壤、土壤肥力条件下，在最适化肥投入时最大生产力，即土地生产力($kg\cdot hm^{-2}$)；t 为纯氮投入量($kg\cdot hm^{-2}$)；c 为参数。

水资源仿真系统模型

沈鸿雁：伊洛河上游资源系统分析 自然资源，1991，2

$$\begin{cases}S_j=S_{j-1}+Q_C(j)-Q_k(j)-Q_s(j)-Q_q(j)\\ u_0\leqslant S_j\leqslant u_p\end{cases}$$

式中，S_j 为 j 时刻地表水库蓄水量；$Q_C(j)$ 为第 j 时刻地表水库的入库径流量；$Q_k(j)$ 为第 j 时刻地表水库开采量；$Q_s(j)$ 为第 j 时刻地表水库损失水量；$Q_q(j)$ 为第 j 时刻地表水库弃水量；u_0 为地表水库死库容；u_p 为地表水库运行时允许蓄水量上界。

生产潜力模型

许学工：黄河三角洲农牧业生产潜力 地理学报，1991，46(2)

(1) 光合生产潜力(Y_0)：

$$Y_0=KA\int_{t_1}^{t_2}\frac{Q_p(t)F(t)}{C(1-B)(1-H)}dt$$

式中，Q_p 为光合有效辐射；F 为最大光能利用率(最大理论值为 11.4%)；C 为干物质的发热量；B 为植物质含水率；H 为植物质含灰分率；A 为经济系数；K 为单位换算系数。

(2) 光温生产潜力(Y_1)：

$$Y_1=Y_0f(T)=\sum_i Y_{0i}T_i$$

式中，T 为温度。

(3) 气候生产潜力(Y_2)：

$$Y_2=Y_1f(W)=\sum_i Y_{0i}T_iW_i$$

式中，W_i 为降水订正函数。

(4) 作物气候生产潜力：

$$Y_{2m}=\sum_i Y_{0i}T_iG_iW_i$$

式中，G_i 为叶面积订正系数。

(5) 干草的光合生产潜力：

$$Y_{0c}=\sum_i 6120.30Q_p$$

杂食性动物的饲料配方模型

林懂明：目标规划在饲料配方中的应用 自然资源，1991，3

(1) 原料营养成分的约束方程：

$$\sum_{j=1}^{N}a_{ij}x_j+nb_i-pb_i=Bb_i\quad(i=1,2,\cdots,N)$$

式中，Bb_i 为第 i 个营养指标的目标值；a_{ij} 为原料营养成分系数矩阵；nb_i 和 pb_i 分别为第 i 个营养指标的负偏变量和正偏变量。

(2) 原料使用量约束方程：

$$\sum_{j=1}^{M}(x_j+nl_i-pl_i)=Bl_i$$

式中，Bl_i 为 x_j 的极限使用比例；nl_i 和 pl_i 分别为负偏变量和正偏变量。

(3) 原料配比总和的约束方程：

$$\sum_{j=1}^{M} x_j + np - pp = 1.0$$

模糊优势和模糊聚类模型

孙若梅：两个模糊集在区域农业生态环境评价中的应用——以四川开县为例．自然资源，1991，3

(1) 模糊优势矩阵 R_I 模型：

$$R_I = (r'_{ij})$$

$$r'_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^{n} D_k(i,j) & (i \neq j) \\ 0 & (i = j) \end{cases}$$

$$(i, j = 1, 2, \cdots, m)$$

$$D_k(i,j) = \begin{cases} 1 & (y_{ik} - y_{jk} > 0) \\ 0 & (y_{ik} - y_{jk} < 0) \\ 0.5 & (y_{ik} - y_{jk} = 0) \end{cases}$$

$$k = 1, 2, \cdots, n; \quad i, j = 1, 2, \cdots, m$$

(2) 模糊聚类 R_{II} 模型：

$$R_{II} = (r''_{ij})$$

$$r''_{ij} = 1 - C\sum_{k=1}^{n} d(y_{ik}, y_{jk})$$

式中，d 为一个适当的函数，来度量 y_{ik} 和 y_{jk} 之间的不同；C 为一个可选择的常数。

生态气候因子对稻米品质影响的评价模型

张高年：我国秦岭—淮河过渡区稻米品质的气候分析．自然资源学报，1991，6(3)

$$\begin{cases} Y_1 = \sum_{j=1}^{n} r_j x_{1j} \\ Y_2 = \sum_{j=1}^{n} r_j x_{2j} \\ \vdots \\ Y_i = \sum_{j=1}^{n} r_j x_{ij} \\ \vdots \\ Y_m = \sum_{j=1}^{n} r_j x_{mj} \end{cases}$$

式中，Y_i 为某个生态气候因子对稻米综合品质形状的作用系数；r_i 为稻米某单一品质形状的权重系数；x_{ij} 为某个生态气候因子对某个稻米品质形状的作用系数；m 为生态气候因子的数目；n 为稻米单个品质形状的数目。

实际光能利用率模型

周兆德：海南岛热带农业光能资源利用率研究．自然资源学报，1991，6(3)

$$E(\%) = \frac{M \cdot H}{\sum Q} \times 100\%$$

如果作物产量(Y)以 $kg \cdot hm^{-2}$ 计，则上式可以写成：

$$E(\%) = \frac{1000 \times Y \times H}{a \times \sum Q \times 666.7 \times 10^4} \times 100\%$$

式中，M 为干物质重的克数；$\sum Q$ 为太阳辐射总量($J \cdot cm^{-2} \cdot a^{-1}$)；$Y$ 为经济学产量(kg)；H 为燃烧 1 克干物质释放的能量，不同作物不同，平均取 $4.25 \times 4.1868 J \cdot kg^{-1}$；$a$ 为经济系数。

农业生产潜力模型

周兆德：海南岛热带农业光能资源利用率研究．自然资源学报，1991，6(3)

作物产量的阶乘模型：

$$Y(Q,T,P) = f_1(Q) f_2(T) f_3(P)$$

$$= 10.49\left(\frac{Q}{4186.8}\right)\left(\frac{1}{30n}\sum_{i=1}^{n} T_i\right)\left(\frac{P}{E_0}\right) \quad (kg \cdot hm^{-2})$$

式中，Q 为年太阳辐射($J \cdot cm^{-2} \cdot a^{-1}$)；$T_i$ 为月平均温度(℃)；P 为年降水量(mm)；E_0 为年最大可能蒸散量(mm)；n 为大于零度以上的月数($n \leq 12$)。

潜在光能利用率模型

周兆德：海南岛热带农业光能资源利用率研究．自然资源学报，1991，6(3)

$$\begin{cases} Y(Q,T,P) = 10.49 \cdot \left(\frac{Q}{4186.8}\right) \cdot \left(\frac{1}{30n}\sum_{i=1}^{n} T_i\right) \cdot \left(\frac{P}{E_0}\right) \\ \text{当} P > E_0 \text{时，取} P = E_0 \\ E(\%) = \frac{Y \cdot 1000 \cdot H}{a \cdot \sum Q \cdot 666.7 \times 10^4} \times 100\% \end{cases}$$

式中，各项含义与前两式相同

土地适宜性划分指标

杨子生：土地适宜性评价中"主宜性"划分问题之初探。自然资源学报，1991，6(3)

(1) 产-投差(product-input gap)——土地作为某种利用的产出量与投入量之差值。若以 G_{pi} 代表产-投差，P 代表产出量，I 代表投入量，则可以表示为：

$$G_{pi} = P - I$$

(2) 产-投比(product-input ratio)——即土地作为某种利用的产出量与投入量之比值。若以 R_{pi} 代表产-投比，则有：

$$R_{pi} = P/I$$

(3) 土地经济-社会适宜性指数(economic-social suitability index of land)。

$$I_{ess} = a \cdot I_{es} + b \cdot I_{ss}$$

式中，I_{ess} 代表土地的经济—社会适宜性指数；I_{es} 代表土地的经济适宜性指数(反映经济适宜性的高低)；I_{ss} 代表土地的社会适宜性指数(反映社会适宜性的高低)；a 和 b 分别是 I_{es} 和 I_{ss} 的权重系数。为了使 I_{ess} 值保持在 0~100 之间，以便于计算、分析、比较、分析，在这里规定：a 和 b 的取值均在 0~1 之间，且两者之和等于 1；I_{es} 和 I_{ss} 取值均在 0~100 之间。

a 和 b 值的确定：经济适宜性和社会适宜性是划分土地主宜性的两个依据，二者同等重要。可大致将其权重系数视为等值，即均取值为 0.5。

I_{es} 值的确定：可采用"样标值法"来确定。若经济效益采用绝对数量指标 G_{pi} 表示，以 G_{pi_i}（i=1，2，3,…)表示土地作为某一利用方式可能取得的经济效益高低，以 G_{pi_i} 中的最高值作为样标值，并用 G_{pi_m} 表示之，则 I_{es} 值可由下式求得：

$$I_{es} = \frac{G_{pi_i}}{G_{pi_m}} \times 100$$

大气水势 $\psi_{W\cdot V}$ 模型

赵立新，荆家海，王韶唐：不同施肥水平对旱地冬小麦水分利用的影响 植物生态学与地植物学学报，1991，15(4)

$$-\psi_{W\cdot V} = \frac{RT}{V_W}\ln\frac{r\cdot h}{100}$$

式中，R 为气体常数；T 为绝对温度；V_W 为水的偏摩尔体积；$r\cdot h$ 为大气相对湿度的百分数；蒸腾强度和气孔阻力用 LI-Cor-1600 型稳态气孔计测定。

水土平衡模型

张永桂：甘肃省河西地区粮食生产潜力和人口承载量研究 自然资源，1991，4

$$A = W/I$$

式中，A 为灌溉面积；W 为最大种植业可利用净水量；I 为灌溉定额。

山地经济林适度规模经营的决策模型

柴发熹，陇南山地经济林适度规模经营的定量研究 自然资源，1991，6

(1) 目标函数模型：

$$Z = f(X_1 + \cdots + X_n)$$

式中，对于决策变量 $X_1,\cdots,X_n$ 的每一个可能取的值 $a_1,\cdots,a_n$ 的全体为一个决策集。

(2) 线性规划模型：

$$\max Z = \sum_{j=1}^{n} C_j X_j$$

式中，C_j 为常量集。

粮食产量及粮食产量变率计算公式

郭建平：气候变化对我国东部地区粮食产量地影响初探。地理研究，1992，11(1)

(1) 粮食产量计算公式：

$$Y = f(Q)\cdot f(T)\cdot f(W)\cdot f(S)\cdot f(M)\cdot f(I)\cdot$$

$$f(W) = \begin{cases} (1-C)R/ET_0 & (0 \leqslant (1-C)R \leqslant ET_0) \\ 0 & ((1-C)R > ET_0) \end{cases}$$

$$f(T) = \begin{cases} 0 & (T \leqslant T_m) \\ T/(T_M - T_m) & (T_m < T \leqslant T_M) \\ 1 & (T > T_M) \end{cases}$$

式中，Y 为粮食产量；$f(Q)$，$f(T)$，$f(W)$，$f(S)$ 和 $f(M)$ 分别为辐射、温度、降水、土壤特性和农技措施对产量影响地订正函数；$f(I)$ 为作物固有的生物特性所决定的粮食产量基础；R 为降水量；ET_0 为潜在蒸散；C 为径流系数；T 为作物生育期间的平均温度；T_M 和 T_m 分别为作物生育所需的上、下极限温度。

(2) 粮食产量变率计算公式：

$$\frac{Y_1}{Y_2}=\frac{f_1(W)\cdot f_1(T)}{f_2(W)\cdot f_2(T)}=\frac{T_1}{T_2}\cdot\frac{R_1}{R_2}\cdot\frac{\left(\sum T_{>0^\circ C}\right)_2}{\left(\sum T_{>0^\circ C}\right)_1}$$

式中，下标 1,2 分别代表 2 种不同的气候情节；R 为降水

有效田间灌水质量指标测度模型

路京选，关志华：有效田间灌水质量指标体系初探．自然资源学报，1992，7(1)

(1) Cogels 均匀度函数：

$$UF(d_i)=1-\frac{S}{\bar{y}}\cdot K(d_i)$$

式中，d_i 为单个作物根系的影响直径；$\bar{y}$ 为平均灌溉入渗水深；修正函数 $K(d_i)$ 的变化范围为 0~1，当根系范围趋于零时，$K(d_i)$ 趋于 1；当根系范围趋于整个田块大小时，$K(d_i)$ 趋于零；S 为入渗水深 y 的标准差，可表达为 $S=\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum(y_i-\bar{y})^2}$，它表征了田间入渗水深分布的总变异。实际上，这种入渗水深的总变差可以分为两部分：一是根系范围内部的入渗水深变差，二是田间各单个作物根系内部平均入渗水深值的分布变异。由于作物根系具有水分综合能力，因而前者并不影响作物生长，后者才是可影响作物生长的有效变差部分，数学上可用有效标准差 $E(d_i)$ 表示，$E(d_i)=S'\cdot K(d_i)$。因此，上式也可以写成 $UF(d_i)=1-\frac{E(d_i)}{\bar{y}}$，$S'=\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(y'-\bar{y}')^2}$ 为第 i 个作物根系内部的平均入渗水深，表示田间各作物 $\bar{y}'$ 的平均值

(2) Wallach 提出的有效均匀度指标：

其原始形式为 Wilcox-Swailes 均匀系数：

$$u_s(z)=1-A_0D(z)/\sqrt{2}$$

式中，z 为土壤埋深；A_0 为土壤表面入渗通量正弦曲线的波幅；$D(z)$ 为 z 埋深处的土壤阻尼系数，$D(z)$ 为取决于水平方向土壤特征长度和土壤表面入渗通量的波长之比，土壤表面的 $D(0)=1$；$u_s(z)$ 反映了 z 埋深处土壤水分入深通量分布的均匀度。通常，由上式所表示的均匀系数随深度而不断增大。考虑到根系分布特点并将根系层内的 $u_s(z)$ 值取平均就可以得到这种反映垂直方向上壤阻尼作用的有效均匀系数

$$\overline{u_s}=\frac{1}{z_r}\int_0^{z_r}\left[1-A_0D(z)/\sqrt{2}\right]\cdot R(z)\cdot dz$$

$$\int_0^{z_r}\cdot R(z)\cdot dz=1$$

式中，z_r 为根系层深度；$R(z)$ 为随深度变化的作物根系分布函数

(3) 修正的 Alchanatis 和 Amir 效率系数：

$$P_a=\left[1-\frac{1}{2}\int_0^L|F(r)-f(r)|\cdot dr\right]\times 100\%$$

式中，$f(r)=\frac{f'(r)}{\int_0^L f'(r)\cdot dr}$，$F'(r)$ 和 $f'(r)$ 分别为距喷滴头位置 r 处单位宽度上的蓄水量和实际灌水量，L 为喷滴头间距和作物行距之间的最小公除数。单位宽度上的蓄水量 $F(r)$ 由预先确定的最佳条状灌水图形得到

咸淡水地区种植结构优化模型

刘春平，罗焕炎：咸淡水地区种植结构优化模型．自然资源学报，1992，7(1)

1. 基本函数(系数)

(1) 地下水系统状态相应方程：

对于线性地下水系统(如承压水)，由于各计算时段有限单元模拟方程均为线性表达式，使用迭加原理容易得到水位关于初始水位 h_τ 和该时段开采量 Q_τ 的线性响应方程。对于二维非承压含水层，其数值模拟方程是关于 h 的二次方程，为导出其响应方程，要求首先对该方程做线性化。如果规划期 τ 划分成 pt 个计算时段，任意假设有一组满足约束条件的开采量 $\overline{Q_\tau}$，代入模拟方程计算得到各计算时段末的水位 $\overline{h_{\tau+1}}$ $(t=1,2,\cdots,pt)$，并形成试解($\overline{h_{\tau+1}}$，$\overline{Q_\tau}$)。在该试解处展开形成关于 $h_{\tau+1}$ 的一阶泰勒线性式为：

$$h_{\tau+1}=\overline{h_{\tau+1}}+J_{h_\tau}\left(h_\tau-\overline{h_\tau}\right)+J_{Q_\tau}\left(Q_\tau-\overline{Q_\tau}\right)$$

式中，J_{h_τ}，J_{Q_τ} 为试点处 $h_{\tau+1}$ 关于计算时段初始水位 h_τ 和开采量 Q_τ 的 Jocobi 矩阵。然后以上述线性方程为基础，对于 $t=1,2,\cdots,pt$，利用迭加原理可以导出规划时段末的状态(水位) $h_{\tau+1}(=h_{pt})$ 关于规划时段初始水位 $h_\tau(=h_1)$ 和开采量 Q_τ 的响应方程 $h_{\tau+1}=F_\tau h_\tau+G_\tau Q_\tau+Z_\tau$，以及整个规划时段 τ 水位平均值的响应方程 $h_{\tau+1}^a=\overline{F_\tau}h_\tau+\overline{G_\tau}Q_\tau+\overline{Z_\tau}$，$F_\tau$，$G_\tau$，$Z_\tau$ 及 $\overline{F_\tau}$，$\overline{G_\tau}$，$\overline{Z_\tau}$ 都是与单元几何形状及试解 $\overline{h_{\tau+1}}$ $(t=1,2,\cdots,pt)$ 有关的系数矩阵。

(2) 水肥反映函数：

$$y=y(W,F)$$

式中，y 为作物单产量；F 为单位面积作物施肥量；W 为作物耗水量，可表达为 $W=P_e-W_s+X$，P_e 为

有效降雨量，W_s 为土壤水利用量；X 为作物生长期灌溉水量。实际中获得上式是十分困难的，为此要求做一些简化以减少资料的需求量。假定同等地力条件下不同实验地块分别施高、中、低肥，测量各实验地块对水分的反应，建立如下的回归或分析方程：$y_i=y_i(W)$，$i=1,2,3$ 分别表示施高、中、低肥。

(3) 水盐反应系数：

将灌溉水水质分为淡水、微咸水和咸水，它们的矿化度分别为小于 $2g\cdot L^{-1}$，$2\sim3g\cdot L^{-1}$ 和大于 $3g\cdot L^{-1}$。假定在同等灌溉条件下淡水区作物产量为 y_j，微咸水区、咸水区产量与 y_j 成比例关系，即：

$$y(\alpha w)=\alpha_i y_i(w)$$

式中，α_i 为比例系数或称水盐反应系数；$i=1,2,3$ 分别表示灌溉水质为淡水、微咸水和咸水。

(4) 作物产量方程：

$$Y_j^T=(1+\theta T)\alpha_i y_i(w)$$

$$(i=1,2,3;\quad j=1,2,3)$$

式中，$T=0,1,2,\cdots,N$

2. 优化模型

假定研究区被分成 K 个大区，每个大区按灌溉水水质及土壤盐渍度分成 L 个子区，每个子区有 I 种可能种植的作物。优化问题的目标函数为：

$$f=\max(f_{po}-f_{pi})$$

式中，po 和 pi 分别代表产出和投入；f 表示费用。

$$f_{po}=\sum_T\sum_k\sum_l\sum_i\lambda_i Y_{ij}^T Z_{kl}^i$$

式中，λ_i 为作物单产价格；Z_{kl}^i 为 T 年份 k 区 l 子区 i 作物种植面积；Y_{ij}^T 为 T 年份 i 作物 j 肥条件下在 k 区 l 子区的产量。

投入费用中有地下水资源投入费用：

$$f_w=\lambda_w\sum_T\sum_\tau\left\{[D-h_\tau^a][Q_\tau]\right\}$$

式中，λ_w 为开采地下水的单位能耗费用。当研究区面积较大时，可假定地下水是以子区方式开采，即以面源代井群；相应地 $[D-h_\tau^a]$ 和 Q_τ 分别表示在规划时段 τ 内各子区水位平均埋深行向量和各子区的开采水量。Q_τ 可表示为 $Q_\tau=\sum_{i\in v}X_{kl}^i Z_{kl}^i$，$v$ 表示规划时段 τ 内水浇地作物集合，X_{kl}^i 为 k 区 l 子区 i 作物灌溉水量。如果以井的方式处理，则 $[D-h_{\tau-1}^a]$ 和 Q_τ 分别表示在规划时段 τ 内各井群水位平均值行向量及单井开采量列向量。

当施肥水平 j 给定后，也可归入固定资源投入项 f_f 中，故：$f_{pi}=f_w+f_f$。以上是整个目标函数的计算工作。

约束条件主要有：

(1) 土地面积约束：

l 子区种植面积应小于或等于该区耕地面积 A_{kl}，即 $\sum_i Z_{kl}^i\leqslant A_{kl}$。由于社会或技术等因素的限制，一些作物只能按计划增长其种植面积，其约束条件可表达为：

$$\sum_k\sum_l\overline{Z_{kl}^i}\geqslant(1-\beta_i T)\sum_k\sum_l Z_{kl}^i$$

式中，$\overline{Z_{kl}^i}$ 为 $T=0$ 年 i 作物种植面积；β_i 为 i 作物每年最大增长系数(%)；夏播作物如玉米一般应小于或等于秋播作物种植面积，即 $Z_{kl}^2-Z_{kl}^1\leqslant0$，上标 1、2 表示夏播和秋播作物；总的耕地面积 A^T 可能随规划年份 T 而变化，因此有 $\sum_k\sum_l\sum_i Z_{kl}^i\leqslant A^T$。

(2) 粮食产量约束：

咸淡水地区土壤贫瘠，不利于粮食生产，为保证自销口粮及饲料粮有：

$$\sum_k\sum_l Y_{ij}^T Z_{kl}^i/PS^T\geqslant EAT_i^T$$

(3) 决策变量上下限约束：

优化模型决策变量为作物灌溉水量 X 及种植面积 Z，而地下水开采量 Q 则为 X、Z 的函数，故不作为决策变量。

$$0\leqslant X_{kl}^i\leqslant TX\qquad 0\leqslant Z_{kl}^i\leqslant TZ$$

(4) 地下水开采量约束：

单井开采量上下限约束：

$$Q_{\min}^t\leqslant Q_\tau^t\leqslant Q_{\max}^t$$

各大区开采能力约束：

$$\sum_l\sum_i X_{kl}^i Z_{kl}^i\leqslant W_{k,\max}^T$$

规划期开采量约束：

$$W_{\tau,\min} \leq \sum_{j=1}^{m} Q_\tau^j \leq W_{\tau,\max}$$

式中，m 为井的个数。

总的开采量约束：

$$W_{\tau,\min} \leq \sum_{\tau=1}^{Tf}\sum_{j=1}^{m} Q_\tau^i \leq W_{\tau,\max}$$

式中，Tf 为规划时段数。

(5) 地下水位约束：

为防止开采井周地下水位埋深太大而影响正常供水，则应有：

$$D - h_{\tau+1} \leq DS_{\max}$$

同时又要限制水位在临界深度以下以避免土壤蒸发积盐，则又应有：

$$D - h_{\tau+1} \geq DS_{\min}$$

式中，D 为井口高度；$h_{\tau+1}$ 由前面的方程可以求出。

玉米生物生产力 P_b 模型

常杰、王文章：防护林网内玉米田生物量和生产力格局的研究。植物生态学与地植物学学报，1992，16(2)

$$P_b = \frac{1}{P}\cdot\frac{dW}{dt}$$

或：

$$P_b = E \cdot L$$

式中，P 为玉米田面积；t 为时间；W 为 t 时间内累积生物量；E 为单位面积同化积累干物质的速率，即单位叶速率；L 为叶面积指数。

农业类型区划分模型

缪成瑞：宁夏南部山区农林牧用地数量配比研究，自然资源，1992，

(1) 农业生态气候资源指数模型：

$$C_r = S_R \cdot A_1 + S_S \cdot A_2 + S_G \cdot A_3$$

(2) 效能指数 C_e 模型：

$$C_e = S_R \wedge S_S \wedge S_G$$

(3) 实际利用效率——利用系数 K 模型：

$$K = C_e / C_r$$

安徽大别山南麓柑橘冻害分布模式

于强：安徽大别山南麓柑橘冻害分布模式的研究，地理研究，1992，11(3)

(1) 地势倾斜度表达式：

$$\alpha_i = \begin{cases} 1 & (\alpha_i' \geq 5^\circ) \\ 0 & (5^\circ > \alpha_i' \geq 1^\circ) \\ -1 & (\alpha_i' < 1^\circ) \end{cases}$$

$$(i = u, m, l)$$

式中，α 为地势倾斜度，下标 u，m，l 分别代表上部、中部、下部；α_i' arctan$(\Delta\overline{H}/D)$，$\Delta\overline{H}$ 为所求区段内偏北部较高处于偏南部较低处的平均高度之差；D 为两处之间的距离。

(2) 山体遮蔽度表达式：

$$\beta = \begin{cases} 2 & (\beta' \geq 8^\circ) \\ 1 & (8^\circ > \beta' \geq 4^\circ) \\ 0 & (4^\circ > \beta' \geq 1^\circ) \\ -1 & (\beta' < 1^\circ) \end{cases}$$

式中，β 为山体遮蔽度；β' 为山体平均遮蔽度。

(3) 最低气温数量模式：

1)平流型：

$$T = T_S + 0.22(\beta - \beta_S) + 0.007(L - L_S) + 0.42(\alpha_m - \alpha_{ms})$$

2)辐射型：

$$T = T_S + 0.32\ln(H/H_S) + 0.009(L - L_S) + 0.46(\alpha_m - \alpha_{ms}) + 0.43(\alpha_L - \alpha_{LS})$$

式中，T 为不同地形处与县站之间的最低气温；H 为海拔高度；L 为山体遮蔽长度；下标 S 表示气象站。

耕地生产潜力模型

聂庆华：陕西省洛川县土地生产潜力及其人口容量研究，自然资源，1992，3

(1) 光能生产潜力 y_0 模型：

$$y_0 = m_0 + k \cdot c(1+N)(1+W)h^{-1} \times \sum_{i=1}^{n}\{Q_{PARi}\cdot\phi(1-\alpha_i)a_i(1-a_i') \times [\beta_i + R_1(1-\beta_i)](1-R_{ii})(1-g_i)\}$$

式中，m_0 为初始生物量；k 为经济系数；c 为换算系数；N 和 W 分别为收获物中灰分和水分涵量；h 为每形成 1kg 干物质需热量；ϕ 为量子转换效率；α_i、a_t 和 a'_t 分别为群体反射率、受光率和非光合器官受光率；β_i 为由植物光饱和强度所决定的光能利用率；R_1 为群体对超过光饱和强度部分的光能利用率；R_{ii} 为呼吸系数；g_i 为茎叶死亡率；Q_{PARi} 为光合有效辐射。

(2) 温光生产潜力 y_T 模型：

$$y_T = y_0 \cdot f(T)$$

$$f(T) = \exp\left[-a\left(\frac{T-T_0}{10}\right)^2\right]$$

式中，$f(T)$ 为温度效应系数，T 和 T_0 分别为作物生育期平均温度和生长最适温度；a 为参数。

(3) 水温生产潜力 y_w 模型：

$$y_w = y_T \cdot f(w)$$

$$f(w) = 1 - k_y\left(1 - \frac{E_T}{E_{Tm}}\right)$$

式中，k_y 为作物反应系数；E_T 为实际蒸散量；E_{Tm} 为潜在蒸散量，即作物需水量

(4) 土壤-气候生产潜力 y_s 模型：

$$y_s = y_w \cdot f(s)$$

$$f(s) = \sum_{j=1}^{n} W_j \cdot A_j$$

式中，W_j 为因子权重；A_j 为 j 因子评分。

农业生产潜力的相关模型

郭岐峰，傅颂龄：我国农业生产潜力的研究进展 地理研究，1992，11(4)

1. 光能生产潜力计算公式

(1) 黄秉维计算公式：

$$Y(Q) = 0.124Q$$

式中，$Y(Q)$ 为光能生产潜力；Q 为太阳总辐射。

(2) 卢其尧计算公式：

$$Y(Q) = 0.385Q_p$$

式中，Q_p 为光合有效辐射。

(3) 李继由计算公式：

$$Y(Q)_i = KE_iQ_i$$

式中，K 为能量转换成产量的系数；E_i 为不同生育时段的光能利用率。

(4) 龙斯玉计算公式：

$$Y(Q) = 0.102\sum\left\{Q_i\left(1-e^{-0.5Li}\right)\left[0.998e^{0.0014}Q'_{p\cdot i} + 0.88e^{-2.5693Li}\left(1-0.998e^{0.0014}Q'_{p\cdot i}\right)(1-di)\right]\right\}$$

式中，Q_i 为各时段太阳总辐射；$Q'_{p\cdot i}$ 为各月平均光合有效辐射日总量。

(5) 霍治国、张养才计算公式：

$$Y(Q) = \sum_{ij} Q\varepsilon(1-\alpha)(1-\tau)(1-\rho)\times(1-N_0)(1-\omega)\cdot\frac{E}{q\cdot(1-c)(1-w)}$$

$$(i=1,2,\cdots,12;\ j=1,2,\cdots,36)$$

式中，ε 为光合有效辐射占投射到作物群体上太阳总辐射的百分比；α 为作物群体对光合有效辐射的反射率；τ 为作物群体透光率；ρ 为植物非光合器官的无效吸收率；N_0 为光饱和点以上未能利用的部分占可利用部分的百分比；ω 为植物呼吸作用消耗的能量占光合作用合成能量的百分率；E 为量子效率；c 为植物中无机养分含量；w 为风干物质含水量；q 为每形成 1 克干物质平均所需热量。

2. 光温生产潜力计算公式

$$Y(Q\cdot T) = Y(Q)\cdot f(T)$$

式中，$Y(Q\cdot T)$ 为光温生产潜力；$f(T)$ 为温度影响的订正系数。

(1) 陈明容计算公式：

$$f(T) = 0.028 + 0.003\,48T + 0.003\,52T^2 - 0.000\,086T^3$$

式中，T 为叶温。

(2) 龙斯玉计算公式：

$$f(T)=0.02-0.0092T_d+0.0049T_d^2-0.000\,119\,2T_d^3$$

$$f(T)=A-0.151T+0.0056T^2-0.000\,14T^3$$

式中，T_d 为白天温度；$A=0.08-1/e^{2.8}+T$，T 为白天温度。

(3) 于沪宁等计算公式：

$$f(T)=0.043\,01T-0.000\,577\,1T^2$$

(4) 李秉柏等计算公式：

$$f(T)=-0.469+0.1058T-0.0019T^2$$

式中，T 为平均气温。

(5) 王书裕等计算公式：

$$f(T)=0.050\,02T-0.000\,694T^2$$

式中，T 为平均气温。

(6) 高亮之等计算公式：

$$f(T)=-2.33+0.25T-0.004\,63T^2$$

$$f(T)=-1.85+0.23T-0.004\,63T^2$$

式中，T 为平均气温。

3. 气候生产潜力计算公式

$$Y(Q.T.W)=Y(Q.T)\cdot f(W)$$

式中，$Y(Q.T.W)$ 为气候生产潜力；$f(W)$ 为水分对产量影响的订正系数。

(1) 邓根云计算公式：

$$f(W)=\frac{\mu-\mu_w}{\mu_f-\mu_w}$$

式中，μ 为土壤含水量；μ_w 为作物凋萎时的土壤含水量；μ_f 为田间持水量。

(2) Doorenbos 模型：

$$f(W)=1-\frac{K_y(ET_m-ET_a)}{T_m}$$

式中，ET_a 为农田某一供水条件下的作物实际蒸散量；ET_m 为充分供水条件下的最大可能蒸散量；K_y 为产量影响系数

(3) 马冉计算公式：

$$f(W)=\begin{cases}\dfrac{P+W-f-D}{E_T} & (P+W-f-D<E_T)\\ 1 & (P+W-f-D\geq E_T)\end{cases}$$

式中，P 为降水量；W 为干旱季节浅层地下水补给土壤水分；f 为径流量；D 为对浅层地下水的补给；E_T 为作物需水量。

(4) 龙斯玉等计算公式：

$$f(W)=\prod_{i=1}^{n}(1-V_i)\times 100\%$$

式中，V_i 为减产率。

(5) 迈阿密模型：

$$TSP_{(T)}=\frac{3000}{1+e^{1.315-0.119T}}$$

$$TSP_{(P)}=3000\left(1-e^{-0.000\,684P}\right)$$

式中，$TSP_{(T)}$，$TSP_{(P)}$ 为某地植物气候生产力；T 为年平均气温；P 为年平均降水量。

(6) Thornthwaite Memorial 模型

$$TSP_{(V)}=3000\left[1-e^{-0.000\,963\,0(V-20)}\right]$$

式中，$TSP_{(V)}$ 为某植物气候生产力；V 为年平均蒸散量。

(7) 筑后数学模型：

$$NPP_m=0.29\left[\exp(-0.216RDI^2)\right]R_n$$

式中，NPP_m 为某植物气候生产力；I_{rd} 为辐射干燥度，$I_{rd}=R_n/lr$，R_n 为净辐射，l 为水的蒸发潜热，r 为年降水量。

4. 农业自然生产潜力计算公式：

$$Y(Q\cdot T\cdot W\cdot S)=Y(Q\cdot T\cdot W)\cdot f(S)$$

式中，$Y(Q\cdot T\cdot W\cdot S)$ 为农业自然生产潜力；$f(S)$ 为土壤肥力订正函数。

(1) 梁荣欣计算公式：

$$f(S)=\frac{\phi}{A}=\frac{\eta(Q'+B')}{A}$$

式中，ϕ 为作物从土壤中摄取的养分量；A 为需肥量；

Q' 为施肥量；B' 为施肥前土壤化验得到的速效 N、P、K 的含量；η 为利用系数。

(2) 孙玉亭计算公式：

$$f(S)=\left[0.78+0.03/W_j\right]B$$

(3) 杨子生计算公式：

$$f(S)=\frac{N_n\cdot V_{ch}\cdot T_{ch}}{1.5\cdot N_r\cdot Y(Q\cdot T\cdot W)}$$

式中，N_n 为养分(μg·g^{-1})；V_{ch}，T_{ch} 分别为耕层容量和耕层厚度；N_r 为主要作物每百公斤产量所需养分量。

(4) 最低因子律模型：

$$Is=\min(Z\cdot T\cdot B\cdot O_m\cdot H\cdot E_c\cdot N_u)$$

式中，Z、T、B、O_m、H、E_c、N_u 分别为土壤剖面、表土质地、土壤耕层结构、土壤有机质、土壤酸碱度、土壤代换量、土壤养分。

南部山区冬季气候模糊聚类分析模型

陈沈斌，江爱良：我国南部山区冬季气候模糊聚类分析及其在农业上的意义 自然资源，1992，4

(1) 标准化处理——原始数据标准化处理模型：

$$x'_{ik}=\frac{x_{ik}-\bar{x}_k}{\sigma_k}$$

式中，$\bar{x}_k$ 为第 k 个气候要素平均值；σ_k 为第 k 个气候要素均方差；x'_{ik} 为经标准化处理的新序列。

(2) 模糊相容关系 λ_{ij} 的计算模型：

$$\lambda_{ij}=\frac{x'_i\cdot x'_j}{|x'_i|\cdot|x'_j|}$$

式中，$x'_i\cdot x'_j$ 为向量的数量积；$|x'_i|$ 和 $|x'_j|$ 为空间向量的模。

水稻产量与产量变异系数模型

程延年：冀、豫、鲁、晋、辽的水稻产量与气候 自然资源，1992，6

(1) 产量 Y 模型：

$$Y=Y_t+Y_w$$

式中，Y_t 为产量的时间趋势项；Y_w 为产量的波动项。

(2) 产量变异系数 C_v 模型：

$$C_v=\frac{1}{\bar{Y}}\sqrt{\frac{\sum(Y_i-Y_{1i})^2}{n-1}}$$

式中，$\bar{Y}$ 为产量平均数；Y_i 为第 i 年产量；Y_{1i} 为第 i 年趋势产量；n 为年数。

土地生产潜力 $P(Q,T,S)$ 模型

郭建平：天津市宁河县土地生产潜力的研究 自然资源，1992，6

$$P(Q,T,S)=C\cdot f(T)\cdot S\cdot Q$$

式中，C 为由太阳总辐射转换成光合潜力的系数；$f(T)$ 为温度订正函数；S 为土地订正系数；Q 为生长季的太阳总辐射

生产力指数 I_p

谢经荣：国外土地生产力评价方法及其进展 自然资源，1992，6

$$I_p=\sum_{i=1}^{n}(A_i\cdot C_i\cdot D_i\cdot F_i)$$

式中，A_i、C_i 和 D_i 分别为各层土壤的有效水、容重和 pH，均为 0~1 之间的数，表示 3 因素对根生长的满足程度；F_i 为各土层理想的根分布状况；n 为 100cm 厚土层的分层数量。

土地生产潜力和人口承载力的计算模型

周镇铨，戴进，姚小强：土地生产潜力和人口承载力方法的研究——以陕西宝鸡地区为例 自然资源，1992，6

1. 实现生产潜力的计算

(1) 光能生产潜力模型：

$$Y=\sum Q_\eta(1-\alpha)(1-\beta)(1-\gamma)(1-\omega)(1-\rho)\Phi(1-x^{-1})H^{-1}$$

式中，α，β 分别为植被光合有效辐射的反射率和投射率；γ 为光饱和率；Φ 为量子转换率；ω 为呼吸消耗率；ρ 为非光合器官无效吸收部分；x 为有机物中含水量；H 为干物质含热率；Q_η 为光合有效辐射。

(2) 温度影响函数模型：

喜温作物的温度影响函数 $f(T)$ 模型：

$$f(T)=\begin{cases}0.027T-0.162 & (6℃\leqslant T<21℃)\\ 0.086T-1.41 & (21℃\leqslant T<28℃)\\ 1.00 & (28℃\leqslant T<32℃)\\ -0.083T+3.6T & (32℃\leqslant T<44℃)\\ 0 & (T<6℃或T>44℃)\end{cases}$$

喜凉作物的温度影响函数 $f(T)$ 模型：

$$f(T)=2.8-0.348T+0.352T^2-0.00867T^3$$

(3) 水分影响函数模型：

$$f(W)=\begin{cases}\dfrac{r}{E_0} & (r\leqslant E_0)\\ 1-\dfrac{r-E_0}{3E_0} & (E_0<r<4E_0)\\ 0 & (r\geqslant 4E_0)\end{cases}$$

式中，r、E_0 为月或旬降水及蒸发力。

(4) 土壤肥力订正函数 $f(s)$ 模型：

$$f(s)=\prod(1-10^{-k_i x_i})$$

式中，k_i 为土壤肥力因素氮、磷、钾在土壤中的有效含量的作用；x_i 为土壤中氮磷钾的速效养分含量

(5) 自然灾害的影响函数 $f(N)$ 模型：

$$f(N)=R/\overline{Y_i}$$

$$\begin{cases}P_i=\dfrac{N_i}{N}\\ R=\sum P_i\overline{Y_i}\end{cases}$$

$$(i=0,1,2,3)$$

式中，P_i 为产量出现的频率；R 为加权平均亩产；N 为总年数；N_i 为 i 等级产量出现的次数；$\overline{Y_i}$ 为 i 等级产量的平均值

2. 人口承载力的最优化方案

(1) 目标函数 $\min f(x_i,y_j)$ 模型：

$$\min f(x_i,y_j)=\sum_{i=1}^{I}\frac{x_i}{p_i}+\sum_{j=1}^{J}\left(y_j\sum_{i=1}^{I}\frac{n_{ji}}{p_i}\right)$$

(2) 约束条件模型：

$$\begin{cases}\sum_{i=1}^{I}u_{i1}x_i+\sum_{j=1}^{J}v_{j1}y_j\geqslant N_1\\ \vdots\\ \sum_{i=1}^{I}u_{ik}x_i+\sum_{j=1}^{J}v_{jk}y_j\geqslant N_k\end{cases}$$

$$\begin{cases}C_{i1}\leqslant x_i\leqslant C_{i2}\\ D_{j1}\leqslant y_j\leqslant D_{j2}\end{cases}$$

$$(x_i\geqslant 0,\ y_j\geqslant 0,\ i=1,2,\cdots,I,\ j=1,2,\cdots,J)$$

式中，x_i 为平均每人每年对第 i 种植物性食物需要量；y_j 为平均每人每年对第 j 种动物性食物需要量；n_{ji} 为生产单位数量第 j 种动物性食物对第 i 种植物性食物的需要量，即饲料转化率；p_i 为第 i 种植物的单产；N_k 为人体所需要第 k 种营养物的数量；u_{ik} 为第 i 种植物性食物所含的第 k 种营养物质的量

(3) 承载量模型：

$$CP=\frac{S_m}{\min f(x_i,y_j)}$$

式中，S_m 为生态系统中人类可以利用的土地资源面积

3. 承载量的预测方案

(1) 技术因子对产量的影响模型：

$$y=\frac{a}{1+\dfrac{b\ln x}{x^c}}$$

式中，a，b，c 为常数；x 为年代编号；y 为粮食产量趋势。

(2) 耕地的变化模型：

$$S=ae^{bt}$$

式中，a，b 为常数；t 为年份

非耕地上的杂草模型

Mohler C L：杂草秧苗对耕地的影响模型. Ecological Applications, 1993, 3(1)

(1) $f_n(D,t)$ 为从 t 年份开始非耕地地块上深度为 D 的种子数目：

$$f_n(D,t+1)=s(D)[f_n(D,t)-h_n(D,t)]$$

式中，$h_n(D,t)$ 等于 t 年份长成深度为 D 的秧苗种子数目；$s(D)$ 是深度 D 上，没有长成秧苗的种子残存率。

$$h_n(D,t)=m(D)f_n(D,t)$$

$$m(D)=m_0e^{-\varepsilon D}\quad(\varepsilon>0,\ 0\leqslant m_0\leqslant 1)$$

式中，ε 是一个描述随着深度的增加出芽率减少的参数；m_0 是 0 深度上种子出芽的比例。已知 $f_n(D,0)=\rho e^{-\gamma D}$ 且 $\rho>0$，则有：

$$s(D)=\beta(1-e^{-\alpha D})\quad(\alpha\geqslant 0,\ 0\leqslant\beta\leqslant 1)$$

式中，α 和 β 是常数

(2) 对于年份 0 和 1 总的出芽可表达为：

$$T_n(0) = m_0\rho(\varepsilon+\rho)^{-1}$$

$$T_n(0) = m_0\rho[(\varepsilon+\rho)^{-1} - m_0(2\varepsilon+\rho)^{-1} - (\alpha+\varepsilon+\rho)^{-1} + m_0(\alpha+2\varepsilon+\rho)^{-1}]$$

(3) 对于轮作耕地，年份 t 出芽总数可表达为：

$$T_r(t) = m_0(\varepsilon D_r)^{-1}(1-e^{-\varepsilon D_r})F^t$$

式中，D_r 是轮作耕地的深度；F 是从 t 到 $t+1$ 年存留在土壤中的种子。

(4) 对于使用浇铸平板犁的耕地，在 0 年份总的出芽率是：

$$T_P(0) = 4m_0(\varepsilon D_p)^{-2}(1-e^{-0.5\varepsilon D_p})^2$$

式中，D_p 是犁地的深度。

杂草与农作物的相关模型

Forcella F, Eradat-Oskoui K, Wagner S W：将杂草种子等级生态学应用到低投入农作物的管理. Ecological Applications, 1993, 3(1)

(1) 玉米与杂草：

$$Y = 67-(4199/X)+(76235/X^2) \quad (r^2=0.70)$$

(2) 大豆与杂草：

$$Y = 92-(5827/X)+(88932/X^2) \quad (r^2=0.76)$$

式中，Y 是农作物产量降低的百分比；X 是仲夏季节杂草的密度。

资源可用性指数计算模型

Wilhelm W W, McMaster G S, Rickman R W et al：氮和水分可用性对冬小麦地上植物发育和生长的影响. Ecological Modelling, 1993, 68

(1) 土壤水可用性指数(K_{SWAI})

由 Rickman 的函数(1975)可定义为：

$$K_{SWAI} = \frac{\lg(\text{可供水百分数}+1)}{\lg 101}$$

(2) 光合有效辐射(PAR)可用性指数可定义如下：

$$I = 1.0 - \frac{I_{la}}{3.5+0.059\,75RR_{\bar{x}}}$$

式中，I 是 PAR 的资源可用性指数，在 0 到 1 之间取值；I_{la} 是叶面积指数；$RR_{\bar{x}}$ 是每天 PAR 收入总量的 5 天(本天加上前 4 天)连续平均值。

土地生产潜力(Y_S)模型

曹明奎：中国农业生态系统的生产潜力和人口承载力. 生态学报, 1993, 13(1)

$$Y_S = Y_W Is$$

式中，$Y_W = \int_{t_0}^{t_1} R_W dt$，为水生产潜力，$R_W = R_n[1-K_y(1-ETA/K_c\times ETO)]$，$t_0$，$t_1$ 分别为作物播种和收获时间，ETA 为实际蒸腾蒸发量，ETO 为参考蒸腾蒸发量，K_c 为作物系数，K_y 为作物反应系数；Is 为相对质量指数。

土地适宜性评价模型

黄杏元，倪绍祥，徐寿成等：求算界限温度日期的一种新方法. 地理学报, 1993, 48(2)

每个栅格单元的评价分值为：

$$R_j(T_k) = \frac{1}{100}\sum_{i=1}^{m} F_{ji}w_i$$

$$G_j(F_{ji}) = 1-|R_j(T_k) - F_{ji}/100|$$

当上式的值达到最大时的 F_{ji}，即为所求的适宜级 S_j。

式中，每个 T_k 对应一组参评因子 $x_1, x_2, \cdots, x_m$；每个因子对应一个属性集 V_i，$V_i = [v_{i1}, \cdots, v_{ij}, \cdots, v_{in}]$，每个因子的属性集都是一个对指定的 T_k 从优到劣的全序集，且满足，$v_{i1} > \cdots > v_{ij} > \cdots > v_{in}$，这些因子按其属性值的优劣，可用下列矩阵表示：

$$R = \begin{bmatrix} w_1F_{11} & \cdots & w_iF_{1i} & \cdots & w_mF_{1m} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ w_1F_{j1} & \cdots & w_iF_{ji} & \cdots & w_mF_{jm} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ w_1F_{n1} & \cdots & w_iF_{ni} & \cdots & w_mF_{nm} \end{bmatrix};$$

F_{ji} 为 x_i 对 T_k 的贡献函数值；w 为 x_i 对 T_k 的权重值；当参评因子 x_i 的属性值在 T_k 的 S_1 要求区间或以上时，$F_{ji}(x_i)=100$；当在 T_k 的 S_4 要求区间以下时，$F_{ji}(x_i)=0$；当介于前两者之间时，$F_{ji}(x_i) = A_{ji}x_i + B_{ji}$。

土地退化模型

郑新年，王长耀，林恒章等：黄土高原晋陕蒙毗邻地区土地退化遥感分析. 地理学报, 1993, 48(2)

(1) 侵蚀模数：

$$W_R = e^{6.01} + \frac{13.35e^{-0.115T}}{\left(1+1.034e^{-0.115T}\right)^2}$$

式中，W_R 为侵蚀模数($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)；$T$ 为时间($10^4 a$)。

(2) 土地退化指数：

$$I_{ld} = \frac{\sum_{i=1}^{9} LQC_i \cdot S_i}{\sum_{i=1}^{9} S_i}$$

式中，LQC_i 为土地质量等(1~9)；S_i 为各土地质量等所占土地之面积

农户生态系统综合评价 P_i 模型

曹凑贵：丘陵地区农户生态系统演替分析，生态学杂志，1993，12(2)

$$P_i = \sum_{i=1}^{m} W_j \cdot \frac{a_{ij}}{a_{1j}}$$

$$(i = 1,2,\cdots,6; \quad j = 1,2,\cdots,m)$$

式中，W_j 为第 j 个评价指标的权重；$\frac{a_{ij}}{a_{1j}}$ 为 i 种类型，第 j 个指标的相对值，这里以农牧型为基准；i 表示类型；j 代表评价指标。

Weaver 组合指数

何祥：我国亚热带低山丘陵地区农业结构调整——以江苏省宜兴市南部为例 地理研究，1993，12(2)

$$P = \min_{1 \le i \le m}\left[\phi_i \mid P_i = \sum_{j=1}^{i}\left(\frac{100}{i} - A_i\right)^2 + \sum_{j=1+2}^{m} A_j^{\ 2}\right]$$

$$(i = 1,2,\cdots,m)$$

式中，m 为实际农业用地类型地数目；i 为假设分布的主要农业用地类型的数目；$A_j (j = 1,2,\cdots,m)$ 为各类农业用地类型占农业用地面积的百分比值；p 为对应最佳近似分布。

农业系统生产力指数 I_{ASP} 模型

卢进登，韩纯儒：农业系统生产力(ASP)的量化及其现状分析．生态学杂志，1993，12(2)

$$I_{asp} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(r_i \cdot Y_i)NV}{S \cdot AL}$$

式中，r_i 为第 i 种经济产品折能系数；Y_i 为第 i 种经济产品总产量；S 为系统的可利用土地面积；NV 为净产值或纯收入；AL 为系统劳动力．

持续农业的评价模型

袁从祎，赵强基：持续农业是生态农业的继续与发展 生态学杂志，1993，12(2)

(1) 持续性 T：

$$Y_n = a + Tn$$

式中，Y_n 为统计期间某一年的生产率；a 为起始的生产率；n 为统计期间的第几年

(2) 均衡性 E：

$$E = \frac{1}{CV} = \frac{\overline{Y}}{SD}$$

式中，CV 为变异系数；$\overline{Y}$ 为平均值；SD 为标准差。

(3) 协调性 H：

$$H = \frac{1}{\sum A_i^2}$$

式中，A_i 为农、林、牧、副、渔各部门产值分别占总产值的比例。

寄生物密度 P 和寄主物密度 N 的二元寄生模型

张学武，古德祥，周之铭：松突圆蚧(*Hemiberlesia pitysophila* Takagi)寄生蜂 Aphytis sp.的寄生与摄食研究 生态学报，1993，13(2)

$$N_a = \frac{(a' + mP^{-1})TN}{1 + (a' + mP^{-1})(T_h' + nP^{-1})N}$$

式中，N_a 为寄生数；a' 为最低寻找效率；m 为寻找效率的干扰振幅；T_h' 为时间阈值；T 为时间。

可能商品量预测模型

韩湘玲等：试论黄淮海地区的自然资源及国家级作物商品基地的建设 自然资源学报，1993，8(2)

$$G = Y_A - VP_{20} - AH$$

式中，G 为各县、区提供某作物的商品量；Y_A 为某作物在该县的总产量；V 为某作物在各县农业人口的人均需要量；H 为某作物的亩均用种量；A 为某作物在该县的播种面积；P_{20} 为 2000 年的农业人口预测值．

此公式的给出目的不是对 2000 年的商品粮量进行预测，而是判断各地区间的差异，以便为商品基地建设提供背景资料。

农田灌溉时量优化模型

赵治君，黄兆宽：有限供水条件下农田灌溉时量优化——以河北省沧东地区为例. 自然资源学报，1993，8(2)

根据作物生理生长和生殖生长的特性，将作物生长阶段分成 N 个生育期，每个生育期(i)分成以旬为标准的灌溉时段(m_i，$i=1,\cdots,N$)。Q_0 为作物生长期内的净可供灌溉水量(mm)，W_0 为播种初期的土壤水有效含量(mm·cm^{-1})。则以生育期为时段的水分——生产模型为：

$$\frac{Y}{Y_m}=\prod_{i=1}^{N}\left[1-K_i\left(1-\frac{AET}{PET}\right)_i\right] \tag{1}$$

$$AET_i=\sum_{i=1}^{M_i}e_{aij} \tag{2}$$

$$PET_i=\sum_{j=1}^{M_i}e_{pij} \tag{3}$$

式中，Y 和 Y_m 为作物实际和最大产量；K_i 为第 i 生育期产量反应系数；e_{aij} 和 e_{pij} 为作物第 i 生育期第 j 旬的实际耗水量和最大需求量。

在以上三式中，只有 e_{aij} 属动态变量，而其余参数均可事先通过计算或实验资料获得。e_{aij} 即作物实际耗水量，通过土壤——水分平衡模型来确定。土壤——水分平衡模型假定在作物根部存在一个时段均匀的有效土壤调节库容(Z_{ij})，亦即作物有效吸水根深；r_{ij} 为时段内的有效降雨，则在无灌溉水源补充条件下有：

$$W_{ij}=\left(W_{i,j-1}\cdot E_{ij}+r_{ij}-e_{pij}\right)/Z_{ij} \tag{4}$$

$$e_{aij}=\begin{cases}e_{pij} & \left(W_{i,j}>0\right)\\ r_{ij}+W_{i,j-1}\cdot Z_{ij} & \left(W_{i,j}<0\right)\end{cases} \tag{5}$$

设 X_i 为分配于第 i 生育期的灌溉水量，U_{ij} 为第 i 生育期第 j 旬的灌溉分配水量，则：

$$X_i=\sum_{j=1}^{m_i}U_{ij}\quad(i=1,\cdots,N) \tag{6}$$

显然在有灌溉水源补充条件下，对作物某一生育期(i)来说，式(2)为 X_i 的函数，由此可将式(6)分解成第 i 生育期的水分-产量模型，即：

$$\frac{Y_i}{Y_{mi}}=\left[1-K_i\left(1-\frac{AET}{PET}\right)_i\right]\left[1-K_{i+1}\left(1-\frac{AET}{PET}\right)_{i+1}\right] \tag{7}$$

若取得作物生长期灌溉配水的最优化，需首先使第 i 生育期的 $\frac{Y_i}{Y_{mi}}$ 取得极大值。由式(7)可得动态规划模型：

$$f_i(Q_i,\ W_i)=\max\left[1-K_i\left(1-\frac{AET}{PET}\right)_i\right]f_{i+1}(Q_i-X_i,\ W_{i+1}) \tag{8}$$

$$(\ 0\leqslant x_i\leqslant Q_i;\ 0\leqslant Q_i\leqslant Q_0;\ i=N-1,\ N-2,\cdots,1)$$

$$f_N(Q_N,\ W_N)=\max\left[1-K_N\left(1-\frac{AET}{PET}\right)_N\right] \tag{9}$$

$$(0\leqslant x_{N_i}\leqslant Q_N;\ 0\leqslant Q_N\leqslant Q_0)$$

方程式(8)和(9)中，AET_i 为 X_i 的函数，Q_i 和 W_i 为状态变量，Q_i 为第 i 生育期的累积净灌溉水量，W_i 为第 i 生育期的初始土壤含水量。因此有：

$$W_{i+1}=W_{i,mi} \tag{10}$$

式中，$W_{i,mi}$ 为第 i 生育期末旬，亦即第 $i+1$ 生育期初旬的有效土壤含水量。

第 i 生育期第 j 旬的土壤含水量由下式水平衡方程求得：

$$W_{ij}=\left(W_{i,j-1}\cdot Z_{ij}+r_{ij}+U_{ij}-e_{pij}\right)/Z_{ij} \tag{11}$$

$$(W_{ij}>0)$$

式中，$W_{i,j-1}\cdot Z_{ij}=W_{i,j-1}\cdot Z_{i,j-1}+W_{i,j-1}$，$\Delta Z_{ij}$ 含土壤有效库容增减引起的旬内土壤水量的变化。

由此，在有灌溉水源补充的条件下的作物实际耗水量，可由式(5)转化成下式：

$$e_{aij}=\begin{cases}e_{pij} & (W_{i,j}>W_c)\\ W_{i,j-1}\cdot Z_{ij}+r_{ij}+U_{ij} & (W_{i,j}<W_c)\end{cases} \tag{12}$$

式中，W_c 为凋萎系数(mm·cm^{-1})。

当旬初有效土壤含水量加上旬内有效降雨足以满足旬内作物最大需水量时，灌溉分配水量(U_{ij})为零。其他情况主要取决于生育期的分配水量(X_i)，以及无

灌溉水源补充条件下的作物实际耗水量等因素。第 i 生育期第 j 旬的灌溉分配水量见下式：

$$U_{ij}=0$$

当 $W_{i,j-1}\cdot Z_{ij}+r_{ij}\geqslant W_c Z_{ij}+e_{pij}$ 时：

$$U_{ij}=\begin{cases}e_{pij}-e_{aij}+W_c\cdot Z_{ij}\\ X_i-\sum\limits_{i=1}^{j-1}U_{ij}\end{cases}\qquad(13)$$

上述公式(1)至公式(13)构成了农田灌溉时量动态优化数学模型。

农田热量、水量盈亏计算公式

赵艺学，李洪建，王铭：山西省中部五大盆地主要作物农田热量、水量盈亏分析．地理研究，1993，12(3)

(1) 农田热量盈亏量计算公式：

1) 一年一熟制，一年两熟制农田热量平衡式：

$$K=H-\left(\sum A+G\right)+\Delta A$$

2)二年三熟制农田热量平衡式：

$$K=2H-\left(\sum A+G\right)+\Delta A$$

式中，K 为农田热量盈亏量；H 为某地某一指标积温年的年均温；ΔA 为两种作物套种间的热量重复量；A 为某作物的热量需求量；$\sum A$ 为两种及两种以上作物热量需求量之和；G 为逸散热量。

(2) 农田水量盈亏量计算公式：

$$B=P+C+(W_1-W_2)+(R+I)-E$$

式中，B 为农田水量盈亏量；P 为作物生育期的降水量；C 为作物生育期地下水通过毛管补充给土壤的水量；E 为作物需水量；R 为作物生育期地表径流量；I 为作物生育期降水补给地下的水量；W_1-W_2 为作物生育期始末土壤水量之差。

旱涝指数计算公式

郝景云，张丕远，周玉孚：利用旱涝县次建立历史时期旱涝指数序列的试验．地理研究，1993，12(3)

$$PD_i=\frac{ND_i-ND}{ND}\times100\%\quad(i=1471\sim1950)$$

$$PF_i=\frac{NF_i-NF}{NF}\times100\%\quad(i=1471\sim1950)$$

式中，PD_i、PF_i 分别为旱县次继涝县次的逐年距平百分率；ND_i、NF_i 分别为逐年旱县次数继涝县次数；ND、NF 分别为 ND_i 及 NF_i 的多年(1470~1950)平均值。

作物灌溉用水动态优化配水模型

黄让堂，姚治军：河北省运东地区农业水资源合理调配．自然资源，1993，3

$$\begin{cases}f_i(Q_i,W_i)=\max\left[1-k_i\left(1-\dfrac{AET}{PET}\right)_i\right]\times\\ \qquad f_{i-1}(Q_i-X_i,W_{i+1})\\ f_N(Q_N,W_N)=\max\left[1-k_N\left(1-\dfrac{AET}{PET}\right)_N\right]\end{cases}$$

式中，K_i 第 i 生育期产量反应系数，AET_i 为 x_i 的函数；Q_i 和 W_i 为状态变量，Q_i 为含第 i 生育期的累积净灌溉水量，W_i 为第 i 生育期的初始土壤含水量

$T_{c\text{-}a}$ 与冬小麦生长的关系模型

刘瑞文，董振国：冠层温度和气温的差与冬小麦生长的关系．生态学报，1993，13(4)

(1) 平均净同化率 $\overline{NAR}$ 模型：

$$\overline{NAR}=\frac{W_2-W_1}{t_2-t_1}\cdot\frac{\ln L_2-\ln L_1}{L_2-L_1}$$

(2) 平均相对生长率 $\overline{R}$ 模型：

$$\overline{R}=\frac{\ln W_2-\ln W_1}{t_2-t_1}$$

式中，W_1、W_2,L_1、L_2,t_1、t_2 分别为前后两次测定的干重、叶面积和时间。

统计分析表明，T_{c-a} 分别与 $\overline{NAR}$、群体干物质相对生长率 $\overline{R}$、粒子相对生长率 $\overline{R}_k$ 呈直线相关，回归方程为：

$$\begin{aligned}&NAR=-1.82-3.50T_{c-a}\\&r=-0.952^{**}\\&\hat{R}=-0.0177-0.0273T_{c-a}\\&r=-0.963^{**}\\&\hat{R}_k=0.056-0.044T_{c-a}\\&r=-0.820^{**}\end{aligned}$$

式中 $T_{c\text{-}a}$ 为白昼 T_c~T_a 的缩写，其中白昼冠层温度(T_c)和气温(T_a)分别取 7：00~19：00 观测一次的平均值。

作物适宜度指数

王季槐，赵松岭，张鹏云等：作物适宜度模型及其应用．生态学报，1993，13(4)

(1) 适宜度 $S_E(t)$ 模型：

当 $r=r(t)$ 连续时：

$$S_E(t)=g(r(t),t)$$

或

$$S_E(t)=\underset{t\in[t_{i-1},t_i)}{u^i}(r(t)) \qquad (i=1,2,\cdots,K)$$

当 $r=r(t)$ 不连续时：

$$S_E(t)=g\left[r(t_j),t\right]$$

或 $(j=1,2,\cdots,m)$

$$S_E(t)=\underset{t_{ij}\in[t_{i-1},t_i)}{u^i}\left[r(t_{ij})\right]$$

$$(i=1,2,\cdots,K;\ j=1,2,\cdots,n_i)$$

式中，

$$g(r,t)=Z_1\cdot Z_2\cdot\cdots\cdot Z_n,$$

$u^i(r)=u^i(r_1)u^i(r_2)\cdots u^i(r_n)$，$i=1,2,\cdots,K$。

(2) 作物各发育阶段的适宜度指数 X_i 模型：

$$X_i=\alpha_i\left\{\int_{t_{i-1}}^{t_i}u^i\left[r(t)\right]dt\right\}\Big/(t_i-t_{i-1})$$

$$(i=1,2,\cdots,k)$$

$$\alpha_i=\inf_{t\in[t_{i-1},t_i)}\{u^i[r(t)]\}$$

或

$$X_i=\alpha_i\frac{\sum_{j=1}^{n_i}\left\{\frac{u^i\left[r(t_{ij-1})\right]+u^i\left[r(t_{ij})\right]}{2}(t_{ij}-t_{ij-1})\right\}}{t_i-t_{i-1}}$$

$$(i=1,2,\cdots,k)$$

$$\alpha_i=\inf\left\{u^i\left[r(t)\right]j=0,1,\cdots,n\right\}$$

式中，α_i 为作物对外部环境作用的惯性；$u^i(r)$ 为适宜度曲线。

山区垂直农业气候分层模型

尹东、余优森、李湘阁：陇南山区白龙江流域农业气候资源的垂直分层及评价．自然资源学报，1993，8(4)

农作物对 n 个气候因子 $x_j(j=1,2,\cdots,n)$ 的适应性都以气候适宜度 $S_{xj}(t_i)(i=1,2,\cdots,m)$ 表示出来之后，就得出用实际资料求算某特征年或多年平均的一种农业气候指数——资源指数计算公式：

$$C_r=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}a_{ij}S_{xj}(t_i)$$

对每一时段 i 都有：$0<a_{ij}<1$，$\sum_{i=1}^{n}a_{ij}=1$

另一种农业气候指数——效能指数的计算公式为：

$$C_e=\sum\left[S_{x_1}(t_1)\wedge\cdots\wedge S_{x_n}(t_i)\right]$$

由上述两种农业气候指数得到可利用系数计算公式：

$$k=\frac{C_e}{C_r}\times100\%$$

以上各种指数称为第一类农业气候指数。当取 $m=1$ 时，在一定时间范围内，由于上述各指数不再具有动态变化的含义，就得到第二类农业气候指数，分别记为：

$$C'_r=\sum_{j=1}^{n}a_jS_{xj}$$

$$C'_e=S_{x_1}\wedge S_{x_2}\cdots\wedge S_{x_r}$$

$$k'=\frac{C'_e}{C'_e}\times100\%$$

农作物减产量的计算公式

陈晋，李强：内蒙古农牧交错带农业灾情及其动态变化研究．自然资源学报，1993，8(4)

$$P_{减}=(D_1A_1+D_2A_2+D_3A_3)M$$

式中，$P_{减}$ 为农作物因灾减产量(kg)；D 为减产幅度，按照自然灾害统计中成灾减产三成、五成、五至八成、八成以上至绝收的等级划分，D_1,D_2 和 D_3 分别取 0.3~0.5，0.5~0.8，0.8~1.0 的中值；A_1、A_2 和 A_3 为对应不同 D 值的农作物成灾面积，取累年的平均值；M 为累年农作物播种面积平均亩产。

农业灾情模型

陈晋，李强：内蒙古农牧交错带农业灾情及其动态变化研究．自然资源学报，1993，8(4)

(1) 逐年产量偏差率的计算：

农作物产量可以看作是光(Q)、温(T)、水(W)、土(S)和农业技术措施(M)的函数：

$$Y_a = f(Q, T, W, S, M)$$

它可以进一步分解为趋势产量(Y_t)和偏差产量(Y_d)两个部分，即：

$$Y_a = Y_t + Y_d$$

式中，Y_t是指气候正常情况下，随着农业技术、管理措施的不断提高应当获得的正常产量，它呈上升趋势，可用增函数拟合；Y_d是指光、温、水偏离正常情况而导致的产量偏差，通过实际产量与趋势产量之差求得。偏差产量与趋势产量的比值就定义为产量偏差率(I)：

$$I = Y_d / Y_t \times 100\%$$

(2) 灾情过程一致性分区：

利用模糊聚类方法，以产量偏差率为指标，进行灾情过程一致性分区。

1) 以农牧交错带各旗县为样本组成样本集，每一样本由各旗县 1949~1987 年 39 年间的农作物产量偏差率组成：

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{i39}) \qquad (i = 1,2,\cdots,41)$$

2) 标定样本间相似程度，即定量刻画不同旗县灾情过程的相似程度。由各样本的r_{ij}组成模糊相容关系矩阵R，r_{ij}可表达为：

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{39}(x_{ik} - \overline{x_i})(x_{jk} - \overline{x_j})}{\sqrt{\sum_{k=1}^{39}(x_{ik} - \overline{x_i})^2 \sum_{k=1}^{39}(x_{jk} - \overline{x_j})^2}}$$

3) 由矩阵R用矩阵乘方法经有限步迭代求模糊等价关系矩阵R^*。

4) 按照模糊等价关系矩阵R^*，对农牧交错地带聚类分区，共划出东北区、东部区、中部区、西部区四个灾情过程一致性的一级区。式中，东北区和东部区可进一步划出两个亚区。

气候生产潜力模型

谢云：内蒙古自治区气候生产潜力的动态分析．自然资源学报，1993，8(4)

$$Y = CH \cdot \sum_{i=1}^{n} Y_c$$

式中，i为作物不同发育期；CH为经济系数，取决于地区经济水平；Y_c为气候潜力($kg \cdot hm^{-2}$)，$Y_c = Y_t \cdot k$；Y_t为光温潜力($kg \cdot hm^{-2}$)，$Y_t = Y_L \cdot f(t)$；Y_L为光合潜力($kg \cdot hm^{-2}$)；$f(t)$为温度订正系数：

$$f(t) = \begin{cases} 0 & (t \leqslant 3^\circ C) \\ \frac{t-3}{19} & (3^\circ C < t < 22^\circ C) \\ 1 & (22^\circ C < t < 25^\circ C) \end{cases}$$

$$Y_L = 2857.5 \cdot Q$$

式中，Q为光合有效辐射($J \cdot m^{-2} \cdot mon^{-1}$)；2857.5 为能量及单位转换系数；$k$为伊凡诺夫湿润度：$k = \frac{R}{E_0} = \frac{R}{0.0018(25+t)^2(100-a)}$；$R$为降水量(mm)；$t$为气温(℃)；$a$为相对湿度(%)。

(1) 光合潜力衰减系数：

$$K_t = \frac{Y_L - Y_t}{Y_L}$$

(2) 光温潜力衰减系数：

$$K_w = \frac{Y_t - Y_c}{Y_t}$$

农田水量平衡模型

董大学，郎明安，李玉山：渭北旱塬丰水年春玉米产量潜势及水肥效应研究．水土保持通报，1993，13(5)

$$\Delta W = P + I - N - F + R - (E_p + E_s)$$

式中，ΔW为土壤储水量变化；P为降水量；F为深层渗漏量；I为人工补给水量；R为地下水补给量；N为地表径流量；E_p为作物蒸腾量；E_s为土壤物理蒸发量。

农业持续发展相关模型

岳天祥，江爱良：我国农业持续发展若干问题浅析．自然资源，1993，5

(1) DLU 战略的多样性模型：

$$CD_{\frac{1}{2}}(R,t) = -2\left\{\ln\left[\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n_i} P_{ij}^{\frac{1}{2}}(R,t)\right] - 0.2695\right\} \bigg/ \ln\varepsilon$$

式中，$\varepsilon = \max\{P_{ij}(R,t)\}$，并且$CD_{\frac{1}{2}}(R,t) \leqslant 0$时，土地管理处于严重病态；$P(R,t)$为广义概率矩阵；$n$为斑块数；$m$为$n$个斑块可划分的类型数。

(2) 土地经营规模的不合理性模型：

$$USD_2(R,t) = \ln\left\{\frac{1}{n(R,t)} \cdot \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n_i}\theta\left[10 - S_{ij}(R,t)\right]\right\} \bigg/ \ln\varepsilon$$

式中，θ 为符号函数；$S(R,t)$ 为面积的广义矩阵。

(3) 经济增长速度 G_y 模型：

$$G_y = k_a \cdot G_a + k_m \cdot G_m + k_s \cdot G_s$$

式中，G_a、G_m 和 G_s 为农业部门、工业部门和服务业部门产出的增长速率；k_a、k_m 和 k_s 为农业部门、工业部门和服务业部门产出的弹性系数。

土地调整结构模型

王卫：贫困山区县级土地利用结构调整模型研究．自然资源，1993，6

$$\min D = g_1(\eta,\rho), g_2(\eta,\rho), \cdots, g_k(\eta,\rho)$$

$$\text{s.t.} A(x) + \eta - \rho = b \qquad x, \eta, \rho \geqslant 0$$

$$g_i(\eta,\rho) = (\mu_i, \omega_i)\begin{pmatrix}\eta \\ \rho\end{pmatrix} \qquad (i = 1,2,\cdots,k)$$

式中，D 为达成函数，为 k 维向量，它的值表达了对解的评价；$g_i(\eta,\rho)$ 为目标函数；μ_i 为第 i 优先级中负偏差变量的权重系数，为 m 维向量；ω_i 为第 k 优先级中正偏差变量的权重系数，为 m 维向量；k 为优先级数；x 为决策变量，为 n 维向量；A 为技术系数，为 $m \times n$ 矩阵；b 为目标值，为 m 维向量；η 为负偏差变量，为 m 维向量；ρ 为正偏差变量，为 m 维向量。

山区农业资源开发的准则模型

郑大豪，秦高：贫困山区农业资源开发模式、经济准则与相应政策探讨．自然资源，1993，6

(1) 第一准则模型：

$$\text{NPV}_L = \text{NPV}_S$$

$$\text{NPV}_L = \sum_{i=1}^{n}(G_{Li} + GI_{Li})/(1+r)^i$$

$$\text{NPV}_S = \sum_{i=1}^{n} G_S/(1+r)^i$$

式中，NPV_L、NPV_S 分别为长周期生产和短周期生产每亩净现值；G_{Li} 为长周期生产第 i 年收益；GI_{Li} 为这个长周期内间、套种作物的短周期生产收益；$(1+r)^n$ 为贴现因素；$\bar{G}_S$ 为对比的农业生产收益。

(1) 第二准则模型：

$$\left[\sum_{i=1}^{n}\frac{G_{Li} + GI_{Li}}{(1+r)^i} \bigg/ \sum_{i=1}^{n}\frac{I_{Li} + II_{Li}}{(1+r)^i}\right] = \left[\sum_{i=1}^{n}\frac{\bar{G}_S}{(1+r)^i} \bigg/ \sum_{i=1}^{n}\frac{\bar{I}_S}{(1+r)^i}\right]$$

式中，$\left[\sum_{i=1}^{n}\frac{G_{Li} + GI_{Li}}{(1+r)^i} \bigg/ \sum_{i=1}^{n}\frac{I_{Li} + II_{Li}}{(1+r)^i}\right]$ 为长周期生产的收益与投资现值比率；$\left[\sum_{i=1}^{n}\frac{\bar{G}_S}{(1+r)^i} \bigg/ \sum_{i=1}^{n}\frac{\bar{I}_S}{(1+r)^i}\right]$ 为短周期生产的收益与投资现值比率；I_{Li} 为长周期生产投入；II_{Li} 为长周期生产中间、套种生产投入；$\bar{I}_S$ 为短周期生产投入平均值。

(3) 第三准则模型：

$$\frac{\Delta NPV_L}{\Delta I_L} = \frac{\Delta NPV_S}{\Delta I_S}$$

式中，$\frac{\Delta NPV_L}{\Delta I_L}$、$\frac{\Delta NPV_S}{\Delta I_S}$ 分别为长周期生产和短周期生产的边际净现值。

土地类型结构分析公式

刘卫东：江汉平原土地类型与综合自然区划．地理学报，1994，49(1)

(1) 对比结构分析：

$$Y_{kt} = \frac{\sum_{g=1}^{m}(x_{kg} - \bar{x}_k)(x_{tg} - \bar{x}_t)}{\left[\sum_{g=1}^{m}(x_{kg} - \bar{x}_k)^2 \sum_{g=1}^{m}(x_{tg} - \bar{x}_t)^2\right]^{\frac{1}{2}}}$$

式中，x_{kg} 和 x_{tg} 分别为第 k 个和第 t 个土地类型图斑各自所属的土地类型的第 g 个要素特征值；$\bar{x}_k = \frac{1}{m}\sum_{g=1}^{m} x_{kg}$；$\bar{x}_t = \frac{1}{m}\sum_{g=1}^{m} x_{tg}$；$g = 1,2,\cdots,m$ 为土地类型构成要素指标序号；$k,t = 1,2,\cdots,n$ 为图斑序号

(2) 空间组合结构分析：

$$L_{kt} = \begin{cases} 1 & \text{（镶嵌关系）} \\ \max\left\{\frac{L_k - L_t - L_N}{L_k}, \frac{L_k - L_t - L_N}{L_t}\right\} & \text{（邻接关系）} \\ 0 & \text{（不接触关系）} \end{cases}$$

$$L_{kt} = \begin{cases} 1 & \text{（镶嵌关系）} \\ \max\left\{\frac{L_k + L_t - L_N}{L_k}, \frac{L_k + L_t - L_N}{L_t}\right\} & \text{（邻接关系）} \\ 0 & \text{（不接触关系）} \end{cases}$$

式中，L_k、L_t 及 L_N 分别为第 k 个、第 t 个及第 k 个和第 t 个图斑共同组成的新图斑的周长。

(3) 时间演替结构分析：

$$P_{kt}=\max\{f\vec{V}_{kt}, f\overleftarrow{V}_{kt}\}$$

式中，P_{kt} 为第 k 个和第 t 个图斑所属的土地类型相互演替转换的概率；f 为演替关系系数；V_{kt} 为演替速度；→ 表示正演替；← 表示逆演替。

太湖流域水体潜力预测模型

安树青，金济民，何炜：江苏太湖流域水体潜力的初步分析．自然资源，1994，1

(1) 年捕捞量预测模型：

$$Y_{t+T}=a_t+b_tT+c_tT^2$$

式中，Y_{t+T} 为 $t+T$ 时刻的预测产量；T 为预测周期；a_t、b_t 和 c_t 为参数。

(2) 淡水养殖的总量预测模型：

1) 皮尔曲线：

$$Y=k/[1+a\exp(-bt)]$$

2) 甘培茨方程：

$$Y'=k\exp(-ae^{-bt})$$

式中，Y 和 Y' 为年养殖量；a、b 为参数；t 为时间；k 为年养殖量上限。

粮食产量模型

马树庆：气候变化对吉林省粮食产量影响的模拟研究。自然资源，1994，1

$$Y=C\cdot\sum_{j=5}^{9}\left[Q_j\cdot f(T)_j\cdot f(R)_j\right]\cdot f(N)$$

式中，Y 为粮(豆)单产；Q 为总辐射量；$f(T)$ 为产量对气温的反应函数；$f(R)$ 为产量对农田水分条件反应函数；$f(N)$ 为产量对作物有效生育日数的反应函数；C 为综合常数。

生态农业区域划分模型

王学萌，聂宏声等：山西省生态农业区域划分的研究．生态学报，1994，14(1)

(1) 极差变换模型：

$$\Phi_{ij}=\frac{x_{ij}-x_{j\min}}{x_{j\max}-x_{j\min}}\cdot 180^\circ$$

式中，Φ_{ij} 为第 i 个样点第 j 个指标变换后的数值，用角度表示；x_{ij} 为第 i 个样点第 j 个指标的原始数据；$x_{j\min}$ 为第 j 个指标的最小值；$x_{j\max}$ 为第 j 个指标的最大值。

(2) 直角坐标计算模型：

$$x_i=\sum_{j=i}^{P}W_j\cos\Phi_{ij}$$

$$y_i=\sum_{j=i}^{P}W_j\sin\Phi_{ij}$$

式中，$i=1,2,\cdots,N$ 为样点号；$j=1,2,\cdots,P$ 为指标号；x_i 为第 i 个样点的横坐标；y_i 为第 i 个样点的纵坐标；W_j 为第 j 个指标的权重。

农作物生产潜力 Y 的估算公式

董玉祥，刘毅华：拉萨市主要农作物生产潜力估算．自然资源，1994，2

$$Y=Y_W\cdot f_{(S)}\cdot f_{(A)}\cdot f_{(H)}$$

式中，Y_W 为气候生产潜力；$f_{(S)}$ 为土壤修正指数；$f_{(A)}$ 为农业技术订正系数；$f_{(H)}$ 为收获产量订正系数。

茶叶生产基地综合评分法

华熙成：浙闽山区茶叶生产基地评价的探讨．地理研究，1994，13(3)

$$F=\sqrt[n]{\prod_{i=1}^{12}P_iW_i}$$

式中，F 为综合评价值；P 为评价值；W 为权系数。

蒸散量模型

丁德埈，张旭辉：江苏淮北地区主要作物需水量的初步研究．自然资源，1994，3

$$E_p=K_sK_cE_o$$

式中，E_p 为实际蒸散量；K_s 为土壤供水系数；K_c 为作物需水系数；E_o 为标准蒸散量。

种植业生产波动指数

朱德海，严泰来，卿笃学：黄淮海平原种植业生产波动分析．自然资源，1994，3

(1) 环比增长率 R_i：

$$R_i=\frac{Y_i-Y_{i-1}}{Y_{i-1}}\times 100\%$$

(2) 波动指数：

$$波动指数=\sum_{i=84}^{n}|R_i|$$

田坎侧向蒸发损失量 W 模型

杨开宝，郭培才：梯田田坎水分耗散及其对作物产量的影响初探. 水土保持通报，1994，14(4)

$$W = W_L - W_S$$

$$W_L = al^b \times 10P_s h$$

$$W_S = 10P_s h \frac{\int_0^{l_0} al^b \mathrm{d}l}{l_0}$$

式中，W_L，W_S 为田面宽度等于 l_0 时的理论和实际储水量；l_0 为田面宽度；h 为田坎高度；P_s 为相应层次土壤容重；a 和 b 为幂函数回归系数；10 为单位折算系数。

适宜高度模型

朱琳：秦巴山区农业气候资源垂直分层及农业合理化布局. 自然资源学报，1994，9(4)

$$H_j = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(a_{ij} - y_{ij})/b_{ij}$$

式中，H_j 为不同剖面农业气候分量综合作用最佳高度；n 为农业气候分量；a 和 b 为农业气候分量统计数；i 为不同农业气候分量；j 为不同剖面。

春小麦产量最优设计模型

党增春，李燕新，刘福宏等：宁南干旱山区春小麦氮、磷施肥模式研究. 水土保持通报，1994，14(6)

$$Y = B_0 + \sum_{j=1}^{p} B_j x_j + \sum_{i<j}^{p} B_{ij} x_i x_j$$

式中，Y 为不同土地农用生态系统中春小麦相应的高产产量；x_i 和 x_j 分别为不同的施肥因子；B_0、B_i 和 B_{ij} 为不同立地与不同施肥固定条件下方程的回归系数。

旱作产量潜力模型

徐宇达，陈国良，穆兴民：不同干旱强度对糜子产量的影响及其在估产中的应用. 水土保持通报，1994，14(6)

$$Y_w = Y_t(1 - R_i)^n$$

式中，Y_t 为光温潜力；R_i 为生育期某时段受旱减产率；i 为时段；n 为受旱时段数。

农作物产量的 DAISY 模型

Svendsen H, Hansen S, Jensen H E：使用 DAISY 模型、模拟两个德国农业生态系统中的农作物产量、水和氮平衡. Ecological Modelling, 1995, 81

(1) 在农作物树冠发展早期，光合作用活动农作物面积指数 I_{la} 为：

$$I_{la} = \begin{cases} S_{ai}W_t & (\sum T_a \leq A_2) \\ \left[1 - \dfrac{a_r^L(\sum T_a - A_2)}{(\sum T_a - A_2) + A_r^L}\right] S_{ai}W_t & (\sum T_a > A_2) \end{cases}$$

式中，W_t 为发芽干物质的累积量；$\sum T_a$ 为发芽以来的温度总和；S_{ai}，a_r^L，A_2 和 A_r^L 均为经验常数。

(2) $F_{g,2}$ 和 $F_{g,3}$ 分别表示每天最大毛树冠光合作用由于水和氮不足而减少，可表达为：

$$F_{g,3} = F_{g,2}\frac{N_c - N_c^o}{N_c^a - N_c^o}$$

式中，N_c，N_c^o 和 N_c^a 分别是实际氮供应，极低氮供应和充足氮供应中的农作物中的氮量。

(3) 每天潜在氮需求 ΔN_u^p 计算如下：

$$\Delta N_u^p = N_c^p - N_c$$

式中，N_c^p 是农作物中的氮的潜在数量。

CERES-小麦模型

Bacsi Z, Zemankovics F：证实：目的还是工具？冬小麦仿真模型应用的结果. Ecological Modelling, 1995, 81

(1) 干物质生产计算：

$$P_C = 7.5 \cdot \mathrm{IPAR}^{0.6}$$

$$C = \mathrm{PCARB} \cdot K$$

式中，P_C(g·cm^{-2})是潜在生物量生产；C(g·cm^{-2})是实际生物量生产；K 是一个介于 0 和 1 之间的压力因子，表示水分和氮的压力。

(2) 蒸腾作用的概念把农作物的干物质生产和水分使用联系起来：

$$Y = TY_p/T_p$$

式中，Y 是实际的干物质生产；Y_p 是潜在的干物质生产；T 是实际的蒸腾作用；T_p 是潜在的蒸腾作用。

(3) 一致性指数 d 被用来检测模型结果和实地观测值之间的匹配程度：

$$d = 1 - \frac{\sum_i [P(i) - O(i)]^2}{\sum (|P(i) - O(\text{Javg})| + |O(i) - O(\text{Javg})|)^2}$$

式中，$P(i)$ 表示第 i 个模拟值；$O(i)$ 表示第 i 个实地观测值；$O(\text{Javg})$ 表示实地观测值的平均值。

空间分布数据配平中国稻田中的碳预算模型

Bachelet D, Kern J, Tölg M：利用空间分布数据配平中国稻田中的碳预算。Ecological Modelling, 1995, 79

(1) 净初级生产(NPP)模型：

$$NPP_T = 3000/[1 + \exp(1.315 - 0.119T)]$$

$$NPP_P = 3000\ [1 - \exp(-0.000664\ PPT)]$$

$$NPP = \min(NPP_T, NPP_P)$$

式中，T 是每年的平均温度；PPT 是每年降水量。

(2) 甲烷模型：

$$MET = 0.007CARB - 0.082NITR + 18.822$$

式中，MET 表示 CH_4 的排放 ($mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)；$CARB$ 表示碳肥的碳输入($kg \cdot hm^{-2}$)；$NITR$ 表示氮肥的输入($kg \cdot N \cdot hm^{-2}$)。

(3) 土壤有机碳的容量：

$$SOC = SOC_w \cdot BD \cdot D$$

式中，SOC 为土壤有机碳，单位是 $g \cdot m^{-2}$；SOC_w 为称量得的土壤有机碳，单位是 $g \cdot g^{-1}$ 土壤；BD 是容积密度，单位是 $g \cdot s \cdot cm^{-3}$；D是土壤深度，单位是cm。

土地开发利用潜力分析模型

史华：塔里木河干流流域土地合理利用与规划．自然资源，1995，1

(1) 光热潜力分析模型：

$$\eta_g = \frac{Y_{max}}{gep} - 1$$

式中，η_g 为土地光热利用潜力；Y_{max} 为土地光温潜力；gep 为作物基期实际产量。

(2) 中、低产田改造的潜力分析模型：

$$\eta_{gp} = 1 - \frac{0.5S_l + 0.75S_m + S_n}{S_w}$$

式中，η_{gp} 为中、低产田改造的潜力；S_l 为低产地面积；S_m 为中产地面积；S_n 为高产地面积；S_w 为耕地总面积。

(3) 土地复种潜力 η_{fb} 分析模型：

$$\eta_{fb} = \frac{C_{fb} - A_{fb}}{S_w}$$

式中，C_{fb} 为可复播面积；A_{fb} 为已复播面积。

农地生产潜力分析模型

赵艺学：砖窑沟流域农地生产潜力的层次分析——以糜子作物为例．地理研究，1995，14(1)

(1) 作物所获得的最大产量计算公式：

当 $Y_m > 20(kg \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1})$ 时：

$$Y_{mp} = CL \cdot CN \cdot CH \cdot G[F \cdot (0.8 + 0.01Y_m) y_0 + (1 - F) \cdot (0.5 + 0.025Y_m) \cdot Y_c]$$

当 $Y_m < 20(kg \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1})$ 时：

$$Y_{mp} = CL \cdot CN \cdot CH \cdot G[F \cdot (0.5 + 0.025Y_m) y_0 + (1 - F) \cdot (0.05Y_m) \cdot Y_c]$$

式中，Y_m 为一定气候条件的作物干物质生产率；Y_{mp} 为作物最大生产潜力；CL 为叶面积指数对产量的校正值；CN 为净干物质生产量的校正值；CH 为作物经济系数；G 为作物总生育期；F 为云量覆盖率；y_0 为一定地点作物在全阴天时的总干物质生产量；Y_c 为一定地点作物在全晴天时的总干物质生产量。

(2) 光热水生产潜力：

1) 可能蒸散量：

$$PE = (W+1)^{-1} \cdot W\{[(1-\alpha)(a + bn/N)Ra] - [\delta T^4 K(0.56 - 0.079 \times 10^{-1}\sqrt{ed \cdot RH}) \times (0.10 + 0.90n/N)]\} + (W+1)^{-1}[0.26 \times 10^{-2} ed \cdot RH(1.0 + 0.54u)]$$

2) 作物需水量：

$$ETM = kc \cdot PE$$

3) 作物实际耗水量：

$$ET_a = \begin{cases} ETM & (P_a + S_{a_{n-1}} > ETM) \\ P_a + S_{a_{n-1}} & (P_a + S_{a_{n-1}} < ETM) \end{cases}$$

4) 产量降低率：

$$B=\left(1-\sum ET_a/\sum ETM\right)\cdot k_y\times100\%$$

5）产量指数：

$$D_i=D_{i-1}\left(1-B_i\right)$$

6）光热水生产潜力：

$$Y_m=Y_{mp}\cdot D_i$$

式中，PE 为可能蒸散量；W 为温度、海拔与蒸散量关系值；α 为下垫面反射率；a 和 b 为与大气透明状况有关的系数；n/N 为日照百分率；Ra 为碧空条件下的太阳辐射；δT^4K 为气温为 TK 时的黑体辐射；ed 为饱和水汽压；RH 为平均相对湿度；u 为地面 2 米高处的平均风速；ETM 为作物需水量；k_c 为作物需水系数；ET_a 为作物实际耗水量；P_a 为平均降水量；S_a 为作物实际消耗一部分水量后的土壤储藏的有效水量；$S_{a_{n-1}}$ 为上旬的土壤储藏的有效水量；B 为生育阶段的产量降低率；Y_w 为受水分限制条件下的作物实际产量；Y_{mp} 为光热生产潜力。

（3）优化模式生产潜力：

$$\begin{aligned}Y=\ &3063.5415-317.50005x_1-11.25x_2+\\&1.2500001x_3+207.4995x_4+142.5x_5+\\&155.625x_1x_2+45x_1x_3+26.25x_1x_4-\\&60x_1x_5-103.125x_2x_3-16.875x_2x_4+\\&133.125x_2x_5-22.5x_3x_4-33.75x_3x_5-\\&22.5x_4x_5-185.17755x_1^2-20.31x_2^2-\\&157.18755x_3^2-80.31258x_4^2-69.06258x_5^2\end{aligned}$$

式中，Y 为因变量、决策变量的函数；x_i 为决策变量，x_1 为播期；x_2 为密度；x_3 为 N 施量；x_4 为 P_2O_5 施量；x_5 为有机肥施量。

土壤蓄水量模型

仇化民，邓振镛：黄土高原旱作田土壤水分效应研究。自然资源，1995，4

$$W_2=W_1+(R+L+G)-(S+\lambda+ET)$$

式中，W_2 为该时期土壤的蓄水量；W_1 为上年土壤的蓄水量；R 为该时期降水量；L 为灌溉量；G 为地下水补给量；S 为渗漏量；λ 为径流量；ET 为作物蒸散量。

农地的适宜性模型

Littleboy M, Smith D M, Bryant M J：建模测定农地的适宜性. Ecological Modelling, 1996,86

（1）预期产量和土地适宜性之间的关系：

基于农作物生长的可得水量（Y_{+n}，kg·hm^{-2}）的产量估算：

$$Y_{+n}=1648-197L-S$$

$$R^2=0.76\quad(n=16311)$$

（2）与水有关的小麦产量和有限营养条件之间的关系（Y_{-n} kg·hm^{-2}）：

$$Y_{-n}=1599-195L-S$$

$$R^2=0.79\quad(n=16311)$$

通过综合分析水分限制、营养限制和由于麦田土壤侵蚀导致的产量下降（$Y_{n,ep}$，kg·hm^{-2}）可以得出小麦产量和土地适宜性等级之间的关系：

$$Y_{-n+ep}=1606-197L-S$$

$$R^2=0.80\quad(n=16311)$$

土壤环境保护模型

Shukla A, Dubey B, Shukla J B：环境的土壤退化对农作物产量的影响——对土壤环境的保护职能. Ecological Modelling, 1996, 86

（1）生产函数：

农作物产量假定通过下面的 Cobb-Douglas 生产函数给出：

$$Y=K^{\alpha_1}L^{\alpha_2}S^{\alpha_3}e^{\lambda t}$$

式中，$Y(t)$ 是总产量；$K(t)$ 是股本；$L(t)$ 劳动力的大小；$S(t)$ 是肥沃的顶层土壤厚度，并且 $\lambda>0$，它是在时间 t 的技术进步速率；α_1、α_2 和 α_3 是系数。

（2）由于环境因素影响，肥沃的顶层土壤退化：

$$\dot{C}=Q-m_1C-m_2CS\quad C(0)>0$$

$$\dot{S}=-r_1S-r_2CS-r_0\omega_0S^2$$

式中，$C(t)$ 是环境因素的累积浓度，例如酸雨，它随着一个常数速率 Q 增加；m_1 是 $C(t)$ 的自然耗损率系数；m_2 是 $C(t)$ 由于土壤的化学反应引起的耗损率系数；r_1 是 $S(t)$ 的自然耗损率系数；r_2 是 $S(t)$ 由于 C 引起的耗损率系数；r_0 是 $S(t)$ 由于平均风速 ω_0 引起的侵

蚀率系数。

(3) 保护模型：

令 $F(t)$ 和 $F_1(t)$ 分别是用于肥沃顶层土壤厚度 $S(t)$ 和控制环境因素的浓度 $C(t)$ 而做出努力的密度，则有：

$$\dot{C} = Q - m_1C - m_2CS - m_0F_1 \quad (C(0) > 0)$$

$$\dot{S} = rFS - r_1S - r_2CS - r_0\omega_0S^2$$

$$\dot{F} = \sigma(S_0 - S) - \sigma_1FS - \sigma_0F \quad (F(0) > 0)$$

$$\dot{F_1} = \upsilon(C - C_0) - \upsilon_0F_1 \quad (F_1(0) > 0)$$

式中，m_0 是 C 由于作出努力 $F_1(t)$ 之后的损耗率系数；r 是 $S(t)$ 由于作出努力 $F(t)$ 之后的增长率系数；σ 是为增加肥沃土壤厚度所作努力 $F(t)$ 的增长率系数；σ_1 是由于对土壤施加努力 F 之后的损耗率系数，σ_0 是所施加努力 F 的自然损耗率系数；υ 是要控制环境因素而作出努力 $F_1(t)$ 的增长率系数；υ_0 是自然损耗率系数；S_0 是我们需要维护的肥沃顶层土壤的初始密度；C_0 是对肥沃土壤无害的环境因素的累积密度。

线性规划模型

陈汉，李艳，陶青子：优化作物布局，合理开发利用水资源．自然资源，1996，1

目标函数 max f 模型：

$$\max f = \sum_{i=1}^{12} C_iA_iX_i$$

式中，X_i 为第 i 种作物面积；A_i 为第 i 种作物单产；C_i 为第 i 种作物单价。

土地资源配置数学模型

王万茂：市场经济条件下土地资源配置的目标、原则和评价标准．自然资源，1996，1

(1) 国民经济折算费用：

1) 折算费用 Z_n：

$$Z_n = C + E_HK$$

式中，C 为产品成本；K 为基本建设投资；E_H 为标准效率系数。

2) 国民经济折算费用：

$$H = \frac{1}{E_{H_2}}F + P + E_{H_1}(K_A + K_B)$$

式中，E_{H_1} 为国民经济投资费用的标准效率系数；E_{H_2} 为农业土地资源利用的效率系数；K_A 为因占用土地而带来的农业损失；K_B 为国民经济中非农业部门的基建投资数额；F 为被占用土地的价值；P 为国民经济中非农业部门年度经营费用。

(2) 土地因素对国民收入增长的贡献份额：

土地资源利用经济效果系数 E_t：

$$E_t = \frac{P}{F}$$

式中，P 为国民收入；F 为占用土地的经济价值。

(3) 单位国民收入占地率：

单位国民收入占地率指标 S：

$$S = \frac{\sum P}{W}$$

式中，$\sum P$ 为国民经济各部门占用土地总量；W 为年国民收入，它是土地生产率得到数。

人口-土地-农产物的关系模型

巨仁，宋桂琴，李锐：水土保持规划治理的回顾与展望．水土保持通报，1996，16(1)

(1) 人对土地的投入量模型：

$$M_{li} = A_{li}U_{li} \quad (i = 1,2,\cdots,m)$$

式中，M_{li} 为人对土地投入第 i 种物量；A_{li} 为土地接纳第 i 种物的面积；U_{li} 为单位土地面积接纳第 i 种物量。

(2) 土地对农产物的生物量模型：

$$M_{pi} = A_{pi}U_{pi} \quad (i = 1,2,\cdots,m)$$

式中，M_{pi} 为土地生产的第 i 种农产物量；A_{pi} 为土地生产第 i 种农产物的面积；U_{pi} 为单位土地面积生产第 i 种农产物量。

(3) 人口对农产物的消费量模型：

$$M_{ci} = A_{ci}U_{ci} \quad (i = 1,2,\cdots,m)$$

式中，M_{ci} 为人口对第 i 种农产物的消费量；A_{ci} 为消费第 i 种农产物的人口；U_{ci} 为单个人对第 i 种农产物的消费量。

"强排强灌"的分析模型

逄春浩，程维新，张兴权等："强排强灌"改良重盐碱地及其人工生态系统稳定性的维持．地理学报，1996，5(1)

(1) 列果斯塔也夫公式：

$$M = M_1 + M_2 + N_1 + N_2 - O_1$$

式中，M 为强灌定额($m^3 \cdot hm^{-2}$)；$M_1 = 10000 \cdot h \cdot r(\beta_1 - \beta_2)$ 为设计土层强灌前土壤含水量与田间持水量差额($m^3 \cdot hm^{-2}$)，β_1 和 β_2 分别代表土壤的田间持水量和强灌前土壤的含水量(干土重%)，h 为计划强灌土层的厚度(m)，r 为计算强灌土层的平均容重($t \cdot m^{-3}$)；$M_2 = \frac{10000 \cdot h \cdot r(S_1 - S_2)}{k}$ 为强灌的土壤中脱盐所需要的水量($m^3 \cdot hm^{-2}$)，k 为排盐系数，表示每立方水在设计土层内能排除的盐分数量($kg \cdot m^{-3}$)，S_1 和 S_2 分别为计划土层强灌前、后的平均含盐量(干土重%)；N_1 为强灌时通过非毛管孔隙渗入深层的损失水量($m^3 \cdot hm^{-2}$)；N_2 为自由水面与土壤的蒸发量($m^3 \cdot hm^{-2}$)；O_1 为强排强灌过程中的大气降水量。

(2) 灌溉地的水量平衡方程：

$$D_{iw} = D_{cw} + D_{dw}(\min)$$

式中，D_{iw} 为灌溉水量；D_{cw} 为作物的田间耗水量；$D_{dw}(\min) = \frac{EC_{iw}}{EC'_{iw} - EC_{iw}} \cdot D_{cw}$ 为淋洗最小排水量，EC_{iw} 和 EC'_{iw} 分别表示灌溉水的电导率和作物的耐盐度($ms \cdot cm^{-1}$)

农业用地需求预测公式

黄以柱：黄河故道区域土地利用的合理结构．地理学报，1996，51(2)

$$P = A/(1-r)$$

$$S_{毛} = S_{净}(1+R)$$

式中，P 为某种农产品需求总量；A 为该农产品的自给性需求量；r 为该农产品连续 3 年的商品率的加权平均值；$S_{毛}$ 为毛用地面积；$S_{净}$ 为净用地面积；R 为田间固定沟渠占地系数(对于大田作物)，或田间固定沟渠和苗圃占地系数(对于果园)，或田间固定沟渠和温室、温床等附属物的占地系数(对于蔬菜)。

干旱与半干旱地区土地生产潜力的测定模型

孙西铭，钟骏平：干旱与半干旱地区土地生产潜力的测定——以新疆阜康县为例．自然资源学报，1996，11(2)

(1) 等雨量线方程：

等雨量线可以通过以下方程得到：

$$R_f = (A - 35.7)/3.48$$

式中，R_f 为年平均降水(mm)；A 为海拔高度(m)。这个关系式是由阜康县及其附近 14 个气象站 10~20 年内的气象资料通过回归分析获得，其相关系数为 0.708。

(2) 土壤相对有效水分公式：

土壤相对有效水分(RAM)可由下式得出：

$$W_{RAM} = (k_1 k_2 \cdots k_n)R_f + G_w$$

式中，W_{RAM} 为土壤相对有效水分(mm)；R_f 为年平均降水(mm)；G_w 为潜水的影响；$k_1, k_2, \cdots, k_n$ 为相对生产力指数(RPI)，k 包括土层厚度、坡度、盐分和土壤质地。这些指数在 0~1 之间变化，它们表明每个土壤因子影响土壤相对有效水分的权重。

(3) 潜水的影响公式：

潜水的影响通过下面公式获得：

$$G_w = E_t / d^2$$

式中，G_w 为每年潜水通过土壤剖面的蒸发量(mm)；d 为潜水深度(m)；E_t 为土壤表面蒸发值，它随土壤质地的不同而不同，壤土的 E_t 值为 117.75，黏土的 E_t 值为 63.93，沙土的 E_t 值为 343.10。

(4) 潜在生产力公式：

潜在生产力可以通过如下公式获得：

$$Y_{cp} = 2.33 W_{RAM}^{1.09}$$

式中，Y_{cp} 为土地潜在生产力，即每年每公顷干物质产量($kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)；$W_{RAM}$ 为土壤相对有效水分(mm)；2.33 为水分使用效率系数。上述公式是由灌木干草原群落获得。

(5) 群落组成指数公式：

群落组成指数(I_{bc})可由下式获得：

$$I_{bc} = \sum FC / \sum FC_1$$

式中，FC 为所有理想多年生植物种的盖度；FC_1 为所有多年生植物种的盖度。植被盖度是通过步点法获得。这个公式给出了群落适合放牧的状态，不理想植物种(如不可食种、有毒种等)的含量越高，群落组成指数(I_{bc})就越小，土地对放牧的适应性也就越差。

根据以上几个方面计算所得的土地相对水分含量及潜在生产力，就可以按照适合实际工作的情况对土地承载力等级做出划分。

中国粮食产量预测方程

陈锡康，郭菊娥：中国粮食生产发展预测及其保证程度分析．自然资源学报，1996，11(3)

利用投入产出分析、变系数预测模型对中国 2030 全国粮食产量进行预测。一个预测方程为：

$$\hat{Y}=138.436-3.5807T-32.768D-62.985X_4+0.908\left(6.58e^{-0.0063988X_6}-1.08\right)X_6+4.140X_7-26.070X_9+0.401\left(4.8624424e^{-0.000999363X_{11}}\right)X_{11}+0.308X_{12}+CA$$

$$R^2=0.9949 \qquad F=809$$
$$N=42 \qquad D.W.=1.70$$

式中，$\hat{Y}$ 为粮食单位面积产量；常数项的变系数为2.29；T 为时间趋势，变系数为-2.51；D 为政策变量(在人的积极性充分发挥的年份中取值为1否则为0)，变系数为3.56；X_4 为受灾面积系数，变系数为-1.78；X_6 为单位面积耕地化肥施用量(折纯)，变系数为6.26；X_7 为灌溉面积比重系数，变系数为3.64；X_9 为单位面积耕地平均使用役畜数，变系数为3.19；X_{11} 为农家肥使用系数，变系数为4.48；X_{12} 为比价，变系数为3.10；CA 为常数调整项(预测用)。

气候生态适应性隶属度函数

黄璜：中国红黄壤地区作物生产的气候生态适应性研究　自然资源学报，1996，11(4)

(1) 温度的隶属度函数：

$$\mu(T)=\begin{cases}\exp[(T-T_{m1})/b]^2 & (T_L<T\leqslant T_{m1})\\ 1 & (T_{m1}\leqslant T\leqslant T_{m2})\\ \exp-[(T-T_{m2})/b]^2 & (T_{m2}\leqslant T<T_H)\\ 0 & (T>T_H或T<T_L)\end{cases}$$

式中，$\mu(T)$ 为温度的隶属度函数；T 为实际的温度值；T_L 为生长的最低温度；T_H 为生长的最高温度；T_{m1} 与 T_{m2} 分别表示最适合温度的上、下限；b 是常数，根据作物生长发育特点、当地气候特点，通过拟和确定隶属度函数的参数，并通过模拟得到反馈后再行修改、确定。

(2) 日照时数的隶属度函数：

$$\mu(T)=\begin{cases}\exp\{-[(S-S_0)/b]^2\} & (S<S_0)\\ 1 & (S>S_0)\end{cases}$$

式中，S 为实际日照时数；S_0 为日照百分率为70%的日照时数，b 为常数。

(3) 降水量隶属度函数：

$$\mu(T)=\begin{cases}\exp\{-[(A-a)/b]^2\} & (A>a)\\ 1 & (A\leqslant a)\end{cases}$$

式中，$\mu(T)$ 为水稻的隶属度函数；A 为实际值，a 和 b 均为常数，分别为0.5和0.2166。

(4) 旱作物干燥度隶属度函数方程为：

$$\mu(T)=\begin{cases}\exp\{[(A-A_{m1})/b_1]^2\} & (A_L<A\leqslant A_{m1})\\ 1 & (A_{m1}\leqslant A\leqslant A_{m2})\\ \exp\{-[(A-A_{m2})/b_2]^2\} & (A_{m2}\leqslant A<A_H)\\ 0 & (A>A_H或A<A_L)\end{cases}$$

式中，A_{m1}、A_{m2}，b_1 和 b_2 均为常数，分别为 0.9,1.1,0.2166,0.3792；A 为干燥度。

作物耗水量 E_r 模型

万卓：宁南黄土丘陵区旱作梯田水分利用率分析　水土保持通报，1996，16(4)

$$E_r=(W_H+R+e)-(W_K+f-n)$$

式中，W_H 和 W_K 分别为播种和收获时2 m土层中水分储量；R 为生育期降水量；f 为渗透至2 m以下的水量；n 为径流量。

能量产投模型

李中魁：黄家二岔小流域能量流的系统分析Ⅱ．种植业子系统能量流分析．水土保持通报，1996，16(5)

$$y=\frac{K_m}{[1+\exp(c+x)]^r}$$

式中，y 为系统产出能量；x 为系统投入能量；r 为产出能的增长率；K_m 一定条件下的最大 y 值；c 为常数。

土地价格 P 模型

任大寨：论土地资源的定价方法　自然资源，1996，5

$$P=\frac{1+i}{i}(R-C+I)\left[1-\frac{R}{(1+i)^{n-1}}\right]$$

式中，R 为土地的年地租量；C 为土地投资补偿；I 为土地投资利息；n 为土地批租年限；i 为利息率。

陆地水分平衡模型

张信宝，安芷生：减少地面蒸发，充分利用降水资源——黄土高原旱坡地生态农业的思考．水土保持通报，1997，17(1)

$$P=E_S+E_C+R+D$$

式中，P 为降水量；E_S 为地面蒸发量；E_C 为植物蒸腾量；R 为地表径流量；D 为深层渗漏量。

麦田能量转化和水分传输模型

吴兴国，刘苏峡：麦田能量转化和水分传输特征. 地理学报,1997, 52(1)

(1) 波文比 β 的计算：

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{1}{\left(1+\frac{\Delta}{\gamma}\right)\cdot\frac{\delta T_w}{\delta T_d}-1}$$

式中，H 为显热通量；LE 为潜热通量；Δ 为饱和水汽压-温度曲线斜率；γ 为干湿常数；δT_d 为两个高度间干球温度差；δT_w 为两个高度间湿球温度差。

(2) 潜热 LE 和感热 H 的计算：

$$LE = \frac{R_n - G}{1+\beta}$$

$$H = R_n - G - LE$$

式中，R_n 为净辐射；G 为土壤热通量。

(3) 空气动力学阻力 r_a 和表面阻力 r_c 的计算：

$$r_a = \frac{U}{u^2}$$

式中，U 为风速；u 为摩擦速度。

$$LE = \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{\rho C_p D}{r_a}}{\Delta + \gamma\left(1+\frac{r_c}{r_a}\right)}$$

式中，ρ 为空气密度；C_p 为空气定压比热；D 为饱和水汽压差。

如果土壤-作物系统无水分胁迫，$r_c = 0$，则：

$$LE_m = \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{\rho C_p D}{r_a}}{\Delta + \gamma}$$

$$r_c = r_a\left(1+\frac{\Delta}{\gamma}\right)\left(\frac{LE_m}{LE}-1\right)$$

土地利用程度综合指数

庄大方，刘纪远：中国土地利用程度的区域分异模型研究. 自然资源学报，1997，12(2)

$$L_a = 100 \times \sum_{i=1}^{n} A_i C_i$$

$$L_a \in [100, 400]$$

式中，L_a 为土地利用程度综合指数；A_i 为第 i 级的土地利用程度分级指数；C_i 为第 i 级土地利用程度分级面积百分比。

ARID CROP 模型

刘建栋等：应用 ARID CROP 模型对中国黄淮海地区冬小麦气候生产力的数值模拟研究. 1997，12(3)

(1) 作物光合作用：

$$F_n = (F_m + R_d)\{1 - \exp[-H\varepsilon/(F_m + R_d)]\} - R_d$$

式中，F_n 是叶片 CO_2 净同化率($kg \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$)；$F_m$ 是高强光下叶片 CO_2 最大净同化率($kg \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$)；$R_d$ 为暗呼吸($kg \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$)；$H$ 为吸收到的400~700nm 范围内的辐射通量($W \cdot m^{-2}$)；ε 为叶片固定 CO_2 的初始光利用率。

(2) 潜在蒸腾作用：

$$\lambda E = \frac{SR + \delta}{S + r^*}$$

式中，λ 为水的汽化热；S 为饱和水汽压曲线斜率；R 为单位叶面积吸收的辐射；δ 为空气干燥力；r^* 为视干湿表常数，分别表示为：

$$\delta = \frac{(e_s - e_a)pCp}{\gamma_b}$$

式中，e_s 为饱和水汽压；e_a 为实际水汽压；pCp 为空气的容积热容量(约 $1200\,J \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)；$\gamma_b$ 为边界层阻力。

视干湿表常数用以下公式计算：

$$\gamma^* = \gamma\frac{\gamma_b + \gamma_c}{\gamma_b}$$

式中，γ 为 $0.63mb \cdot K^{-1}$；γ_c 为叶面对水汽的阻力。

(3) 土壤中水分的运动及实际蒸腾——非均匀土壤——根系统中的一维水通量模型：

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial z} - M$$

式中，θ 为容积含水量($cm^3 \cdot cm^{-2}$)；t 为时间(d)；M 为单位土壤容积中的根在单位时间内的吸水量($cm^3 \cdot cm^{-2} \cdot d^{-1}$)；$q$ 为水流通量($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)；$z$ 为垂直坐标，始于土壤表面，向上为正。

考虑到土温对有效根吸水的影响，对根深 zg 内的 M 积分，就得到实际蒸腾速度($cm \cdot d^{-1}$)：

$$T=\int_0^{zg} M\mathrm{d}z$$

宁夏南部山区春小麦生产潜力计算模型

彭乃志、李军、赵新平等：春小麦生产潜力与持续发展——以宁夏南部山区为例，自然资源学报，1997，12(3)

(1) 宁夏南部山区春小麦光温生产潜力 $y(Q,T)$ 的计算：

当 $y_m > 20\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 时：

$$y(Q,T)=C_L C_N C_H G\left[F(0.8+0.01y_m)y_0+(1-F)(0.5+0.025y_m)y_c\right]$$

当 $y_m > 20\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 时：

$$y(Q,T)=C_L C_N C_H G\left[F(0.5+0.025y_m)y_0+(1-F)(0.05y_m)y_c\right]$$

式中，$C_L=0.5$，是叶面积订正系数；$C_N=0.6$，是作物干物质生产量校正系数；$C_H=0.46$，是当地春小麦的收获系数；$G=120\text{d}$，是作物生长期天数；y_m 是在一定气候条件下作物干物质生产率，是温度和作物种类的函数。y_0 和 y_c 分别为全阴天和全晴天时的作物总干物质生产量。F 是白天中云的覆盖率，由下式计算：

$$F=(Rse-0.5Q)/0.8Rse$$

式中，Rse 是晴天最大入射短波辐射($\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)；$Q$ 是实测入射短波辐射($\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)，考虑到宁南山区地形复杂且海拔较高(都在1500m以上)，故对 Q 的推算采用了能进行海拔高度订正的理想辐射 Q_m 作为初始值，用周围的银川、兰州等8个辐射站的辐射资料建立方程：$Q=Q_m(a+bn/N)$，n 是实测日照时数；N 是一天内可能的日照时数，$N=|\omega|/7.5$，$\omega=\arccos(-\tan\varphi\tan\delta)$，$\delta=23.45\sin[360(284+i)/365]$，$\omega$ 是日末时角，δ 是太阳赤纬，i 是某一天在一年中的序号($i=1,2,\cdots,365$)；Q_m 可由下式确定：

$$\begin{cases} Q_m=Q_d+Q_i \\ Q_d=\int_0^{\infty} Q_{0\lambda}\cdot P_\lambda^m(O_3)\cdot P_\lambda^m(A)\mathrm{d}\lambda-\Delta C \\ Q_i=\frac{1}{2}(I_0-Q_d)(\sin\varphi\sin\delta-\cos\varphi\cos\delta\cos\omega) \end{cases}$$

式中，Q_d、Q_i 分别是理想直接辐射和理想散射辐射；$Q_{0\lambda}$ 是大气上界波长为 λ 的太阳辐射；m 是大气光学质量；$P_\lambda(O_3)$ 是波长为 λ 的 O_3 透明系数；$P_\lambda(A)$ 是波长为 λ 的不含 O_3 的空气透明系数；ΔC 是 CO_2 和 O_2 吸收的订正值；I_0 是太阳常数；a、b 是待定参数。式中，有关辐射项的单位都转化成蒸发当量(mm)($1\text{mm}\approx 247\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$)。

(2) 宁夏南部春小麦气候生产潜力 $y(Q,T,W)$ 的计算：

用Doorenbos模型求算作物气候生产潜力过程如下：

春小麦需水量 E_m：

$$E_m=K_c E_0$$

式中，K_c 是作物系数；E_0 是蒸发力，$E_0=(\Delta H+\gamma E_a)/(\Delta+\gamma)$，$\Delta$ 是气温为 t 时的饱和水汽压曲线的斜率($\text{hPa}\cdot\text{K}^{-1}$)，$H$ 是净辐射量($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$)，$\gamma$ 是干湿球参数($\text{hPa}\cdot\text{K}^{-1}$)，$E_a$ 是干燥力($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$)。

由于宁南山区海拔都在1500m以上，故式中，对 γ 做了如下处理：

$$\begin{cases} \gamma=C_p P/\varepsilon L \\ P=P_0\cdot 10^{-\frac{Z}{18400(1+\alpha t)}} \\ L=2500.6-2.37t \end{cases}$$

式中，C_p 是空气定压比热($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{k}^{-1}$)；$P$ 是本站气压(hPa)；$\varepsilon=0.622$ 是水汽分子量与干空气分子量的比值；L 是水的汽化潜势($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$)；$P_0=1013.3\text{hPa}$，是海平面气压；$Z$ 是海拔高度(m)；$a=1/273$，是气体膨胀系数；t 是气温(℃)。

春小麦各生育期实际耗水量 E_r 的计算：

当生育期降水量 P 加前期土壤有效水分含量 W_s 减去地表径流量 f 大于需水量 E_m 时，$E_r=E_m$，同时土壤有剩余水分储存 $\Delta W_S=P+W_S-f-E_m$；当 $P+W_S-f<E_m$ 时，$E_r=P+W_S-f$，$\Delta W_s=0$。

春小麦候潜力的计算：

$$y(Q,T,W)=I_n y(Q,T)$$

式中，I_n 是春小麦最后生育阶段的产量指数。

玉米生长条件下农田土壤水分动态预报模型

康绍忠，张富仓，梁银丽：玉米生长条件下农田土壤水分动态预报方法的研究　生态学报，1997，17(3)

(1) 土壤水分运动基本方程：

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left[D(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial z}\right]-\frac{\partial k(\theta)}{\partial z}-S(z,t)$$

式中，θ为土壤容积含水率；t为时间；z为垂直坐标，以土壤表面为参考面，向下为正；$D(\theta)$为土壤水分扩散率；$k(\theta)$为土壤导水率；$S(z,t)$为作物根系吸水率。

(2) 玉米根系吸水模式：

$$S(z,t)=A\cdot ET(t)\cdot\frac{\exp\left[-0.7597\left(\frac{z}{z_r}-0.2821\right)^2\right]}{z_r}$$

$$A=1-\exp(-0.4016I_{la})$$

式中，$ET(t)$为t时刻玉米的实际蒸发蒸腾率；z_r为玉米根系层深度；I_{la}为玉米冠层叶面积指数。

(3) 玉米蒸发蒸腾模型：

$$ET(t)=k_c(t)\cdot k_w(t)\cdot ET_0(t)$$

式中，$k_c(t)$,$k_w(t)$分别为t时刻的作物系数和土壤水分修正系数；$ET_0(t)$为由气象因素计算的参考作物蒸发蒸腾。

欧式距离 $L(X_i,Y_j)$模型

杨新民，王文焰，沈冰：陕西黄土区土壤的农业水文特性研究。水土保持通报,1997，17(5)

$$L(X_i,Y_j)=\sqrt{\sum_{k=1}^{S}\left(X_{ik}-Y_{jk}\right)^2}$$

式中，X_{ik}为第i个样本的第k个指标(分量)；Y_{jk}为第j个样本的第k个指标；S为指标容量。

总产量年际变化ΔTY_i模型

周子康，刘为纶：从减灾和提高气候资源利用效率角度探讨浙江省的粮食生产．自然资源,1997，6

$$\Delta TY_i=\Delta Y_iS_{i-1}+Y_{i-1}\Delta S_i+\Delta Y_i\Delta S_i$$

式中，i为年份；ΔY_iS_{i-1}，$Y_{i-1}\Delta S_i$和$\Delta Y_i\Delta S$分别为单产变化影响、面积变化影响和交互作用。

麦田蒸腾需水量公式

谢贤群，吴凯：麦田蒸腾需水量的计算模式．地理学报，1997，52(6)

若作物需水量被定义为充分湿润时(土壤水分能完全满足作物的需水要求)、气孔充分开启，气孔阻力达到最小时的作物蒸腾量，则作物蒸腾需水量CWR(mm)可表达为：

$$CWR=\frac{1}{L}\cdot\frac{\Delta(R_n-R_{sn})+\rho C_pD/r_{ac}}{\Delta+\gamma\left(1+r_{ST}^0/r_{ac}\right)}$$

式中，r_{ST}^0为冠丛总的最小气孔阻力($s\cdot m^{-1}$)；L为汽化潜热($J\cdot g^{-1}$)；ρ干空气密度($g\cdot m^{-3}$)；C_P为空气定压比热($J\cdot g^{-1}\cdot °C^{-1}$)；$\gamma$干湿球常数，它们均为常数；$D$为冠层上空气的饱和差(hPa)；$\Delta$为饱和水汽压随温度变化的斜率($hPa\cdot °C^{-1}$)；它们可根据田间小气候观测中的气温和湿度观测计算求得。

辐射收支、热量平衡方程

莫兴国，刘苏峡，于沪宁等：冬小麦能量平衡及蒸散分配的季节变化分析．地理学报，1997，52(6)

(1) 麦田生态系统的辐射收支可表示为

$$R_n=Q_t-Q_r+L_n$$

式中，R_n为净辐射；Q_t为太阳总辐射；Q_r为反射辐射；L_n为净长波辐射。

(2) 生态系统获得的净辐射经过转化，形成土壤热通量G，感热通量H，潜热通量LE_t，作物光合固定能量P和作物内能M，即：

$$R_n=G+H+LE_t+P+M$$

在实际工作中，P和M的总和一般比主要成分的测量误差还小，可以忽略，则有：

$$LE_t=\frac{R_n-G}{1+\beta}$$

式中，β为波文比。

(3) 为分析作物蒸散满足程度，需计算潜在蒸散LEp, Penman-Monteith 公式，

$$LEp=\frac{S(R_n-G)+\rho C_pD/r_a}{S+\gamma}$$

式中，$r_a=\left(\ln\frac{z-d}{z_{om}}-\varphi_m\right)\left(\ln\frac{z-d}{z_{ov}}-\varphi_v\right)/\left(k^2u\right)$；$z$为参考高度，$d$为零平面位移，$u$为参考高度的风速，$D$为空气饱和水汽压差，$\varphi_m$和$\varphi_v$分别为动量和热量传输稳定度订正常数，$z_{om}$和$z_{ov}$分别为动量和水汽传输地表粗糙度；$k$为卡门常数；$\rho$为空气密度；$C_p$为空气定压比热；$r_a$为空气动力学阻力。

作物蒸腾公式

张喜英：冬小麦、夏玉米叶水势、蒸腾和液态水流阻力的田间试验研究．地理学报，1997，52(6)

$$E=\frac{\varphi_s-\varphi_r}{R_{sr}}=\frac{\varphi_r-\varphi_x}{R_{rx}}=\frac{\varphi_x-\varphi_L}{R_{xL}}=\frac{\varphi_L-\varphi_a}{R_{La}}$$

式中，φ_s，φ_r，φ_x，φ_L，φ_a 和 R_{sr}，R_{rx}，R_{xL}，R_{La} 分别为代表土壤、根、茎、叶子和大气的水势及水从土到根、从根至茎、从茎至叶和从叶至大气的传输阻力。它可表达为 $E=\frac{\varphi_s-\varphi_L}{R_{sL}}=\frac{\varphi_L-\varphi_a}{R_{La}}$，$R_{sL}$ 为从土至叶的传输阻力。

冬小麦水分利用效率

李俊，于沪宁，刘苏峡：冬小麦水分利用效率及其环境影响因素分析　地理学报，1997，52(6)

(1) 冬小麦水分利用效率：作物群体水分利用效率(W_{UE})可由田间 CO_2 通量(F_c)与蒸散量(ET)之比计算

$$W_{UE}=\frac{F_c}{ET}$$

式中，$ET=\frac{R_n-G}{(1+\beta)\lambda}$；$ET$ 为蒸散量($kg\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$)；$R_n$ 为入射净辐射($W\cdot m^{-2}$)；G 为土壤热通量($W\cdot m^{-2}$)；λ 为汽化潜热($J\cdot kg^{-1}$)；$\beta=\frac{C_p\rho}{\lambda\rho_a}\frac{\partial\theta}{\partial W}$ 为波文比；C_p 为定压比热($J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$)，$\rho$是空气密度($kg\cdot m^{-3}$)；$\rho_a$ 为干空气密度($kg\cdot m^{-3}$)；θ 为平均位温(K)；W 是空气湿度(质量混合比)。

(2) 植物的水分利用效率：根据 Fick 扩散定率，水汽和 CO_2 通量可由浓度梯度和扩散阻力来描述，则植物的水分利用效率可表达为：

$$W_{UE}=\frac{\partial C(r_a+r_{st})}{\partial e(1.36r_a+1.56r_{st}+r_m)}$$

式中，∂C 为叶-气 CO_2 浓度差；∂e 为叶-气水汽压差；r_a 是水汽扩散的边界层阻力；r_{st} 是水汽扩散的气孔阻力；r_m 是 CO_2 在叶片内扩散的叶肉阻力。

可持续农作物产量模型

Svirezhev Y M, Svirejeva-Hopkins A：可持续生物圈——可持续性的基本概念的关键概述．Ecological Modelling, 1998, 106: 47~61

(1) 农作物产量：

$$y=k(1-r)P_1$$

式中，P_1 是农业生态系统总产量；r 是呼吸系数；k 是从系统中剥离的净生产部分。

(2) 系统的熵平衡：

$$\sigma T=(1-k)(1-r)P_1+rP_1+W-P_0$$

式中，σ 是农业生态系统的一个区域单元的每年熵产量；T 是生境(K)的生长期平均温度；W 是人工能量流入；P_0是连续封闭系统的毛产量

潜在土壤蒸发模型

Brisson N, Itier B, L'Hotel J C et al：Shuttleworth-Wallace 模型参数化来估算农作物模型中的每天最大蒸腾量．Ecologica. Modelling, 1998, 107

$$\lambda E_{ps}=\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}R_n[\exp(-CI_{la})+(1-\alpha)r_{aa}/r_{as}]+\rho C_pD\tau/((\Delta+\gamma)r_{as})$$

式中，λE_{ps}是潜在土壤蒸发量；Δ是饱和斜率；γ是 Psychrometric 常数；R_n 是每天净辐射；C 是净辐射的消光系数；I_{la} 是叶面积指数；α 是 Priestley-Taylor 系数；r_{aa} 是树冠和气象层之间的空气动力学阻力；r_{as} 是土壤和树冠之间的空气动力学阻力；ρ 是大气密度；C_p 是大气比热；D 是以 mb 为单位的水蒸气气压差额；τ 是从秒到天的时间换算因子。

作物水分利用效率模型

刘文兆：作物生产、水分消耗与水分利用效率间的动态联系　自然资源学报，1998，13(1)

$$W_{UE}=\frac{Y}{ET}$$

式中，ET 为全生育期蒸散量，即耗水量；$Y=f(ET)$ 为经济产量。

对上式两边求导数并整理得：

$$\frac{dW_{UE}}{dET}=\frac{(E_{WP}-1)\cdot W_{UE}}{ET}$$

式中，$E_{WP}=\left(\frac{dY}{dET}\right)\cdot W_{UE}^{-1}$ 为作物水分生产弹性系数(elasticity of crop water production)；当 $E_{WP}>1$ 时，W_{UE} 随 ET 增加而增加，反之，当 $E_{WP}<1$ 时，W_{UE} 随 ET 增加而减小；当 $E_{WP}>0$ 时，Y 随 ET 增加而增加，反之，当 $E_{WP}<0$ 时，Y 随 ET 增加而减小；当 E_{WP} 分别等于 1 或 0 时，W_{UE} 与 Y 分别取得最大值(如果曲线 $Y=f(ET)$ 下凹，或先上凹而后下凹)；当 E_{WP} 恒等于 1，不随 ET 而变化，则表明 W_{UE} 为常数。

耕地重心和生态背境质量指数

高志强，刘纪远，庄大方：我国耕地面积重心和耕地生态背境质量的动态变化　自然资源学报，1998，13(1)

(1) 面积重心模型：

设已知某区域有 n 个质点 $P_1, P_2, \cdots, P_n$，其质量(如人口、耕地面积、产值等)分别为 Q_1，Q_2，$\cdots, Q_n$。设 $P_i(X_i, Y_i)$ 到重心 $M(X,Y)$ 的距离为 $R_i=\sqrt{(X-X_i)^2+(Y-Y_i)^2}$，则总距离为：

$$S=\sum_{i=1}^{n} Q_i \cdot R_i$$

上式无解析解，可用叠代公式求解，叠代公式为：

$$X^{(k+1)}=\frac{\sum_{1}^{n}\frac{q_i x_i}{\sqrt{(x_i-x^k)^2+(y_i-y^k)^2}}}{\sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{\sqrt{(x_i-x^k)^2+(y_i-y^k)^2}}}$$

$$Y^{(k+1)}=\frac{\sum_{1}^{n}\frac{q_i y_i}{\sqrt{(x_i-x^k)^2+(y_i-y^k)^2}}}{\sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{\sqrt{(x_i-x^k)^2+(y_i-y^k)^2}}}$$

(2) 耕地生态背景质量指数：

若 QI_j 为 j 行政单元的耕地生态背景质量指数；Q_i 为第 i 级的生态背景等级质量值；A_i 为第 i 级的耕地面积；S_j 为 j 行政单元的面积，则：

$$QI_j=100\sum_{i=1}^{5} Q_i \frac{A_i}{S_j}$$

农业化肥氮磷钾需求比例分析模型

陈同斌，陈世庆，徐鸿涛等：中国农业化肥氮磷钾需求比例的研究．地理学报，1998，53(1)

(1) “模拟农作物”的单产量：

$$Q_m=\sum_{i=1}^{n}(Q_i p_i)$$

式中，Q_m 为“模拟农作物”的单产($kg \cdot hm^{-2}$)；Q_i 为每种主要农作物的单产($kg \cdot hm^{-2}$)；p_i 为权重系数；i 为农作物种类的代号；n 为主要农作物种类数。

(2) 每公顷播种面积的土壤所提供的养分量：

$$S_i=\sum(C_i-O_i-F_i)$$

式中，S_i 为土壤供应的养分($kg \cdot hm^{-2}$)；C_i 为农作物吸收的养分($kg \cdot hm^{-2}$)；O_i 为有机肥供应的养分($kg \cdot hm^{-2}$)；F_i 为化肥供应的养分($kg \cdot hm^{-2}$)；i 为养分种类(氮、磷或钾)的代号。

地价比照法(标准田法)

陈浮，刘伟，王铁卫等：农用土地价格评估．自然资源学报，1998，13(2)

$$P_i=P_0+(P_1-P_0)\cdot\frac{F_i-F_0}{F_1-F_0}$$

式中，P_i 是具体地块价格；P_0 是低标准田价格；F_0 是低标准田评价分值；P_1 是高标准田价格；F_1 是高标准田评价分值；F_i 是具体地块评价分值。

水土保持经济效益分析模型

田红：水土保持经济效益分析的计算机系统——以铁瓦河小流域为例．水土保持通报，1998，18(2)

(1) 静态分析模型：

$$b=a-(k+c)$$
$$p=\frac{a}{k+c}$$
$$B_0=\sum(at-kt-ct)$$

式中，b 为静效益；p 为产投比；B_0 为投资回收年。

(2) 动态分析模型：

$$B=\sum(b_t-K_t-C_t)/(1+i)\wedge t=0$$

式中，i 为内部回收率。

农业气象灾害风险度模型

杜鹏，李世奎：农业气象灾害风险分析初探．地理学报，1998，53(3)

$$F_s=1-(1-R_{am1})(1-R_{am2})\cdots(1-R_{amn})$$

$$R_{am}=1-\int_{x_0}^{x_a}f(x)dx=\int_{x_b}^{x_0}f(x)dx$$

式中，$R_{am1}, R_{am2}, \cdots, R_{amn}$ 为各风险链的风险度；F_s 为农业气象灾害风险体系的风险度；x_0 为目标产值；x_a 为最优产值；x_b 为最不利产值；$f(x)$ 为产值 x 的概率分布函数。

农业水资源的优化空间配置模型

彭新育，王力：农业水资源的空间配置研究．自然资源学报，1998，13(3)

(1) 灌溉系统水资源成本分析模型

源头成本(C_S)汇总起来有：

$$C_S=\lambda_0+C_1+C_2+C_3$$

式中，λ_0 是源头水资源影子价格；C_1 是提水成本；C_2 为维持成本；C_3 是管理成本。这些成本对于任一单位水资源而言是在源头确定的，不会因空间距离而变化。

空间配置成本则由三部分组成。首先，水资源沿灌溉渠道输送时，因下渗、侧渗而发生水量损失。设有一输送效率系数 $h(y,X)$，y 代表空间距离，X 代表渠道的投入向量，不同的 X 意味着渠道的技术选择，更多的投入使灌溉系统的输送效率更高。$h(y,X)$ 有以下性质：

$$0 \leqslant h(y,X) \leqslant 1 \qquad h(0,X)=1$$

$$\partial h/\partial y \leqslant 0\text{，}\ \partial^2 h/\partial y^2 < 0\text{；}$$

$$\partial h/\partial X \geqslant 0\text{，}\ \partial^2 h/\partial X^2 < 0$$

对于距离源头 y 处，源头送水量 Q、收到水量为 q，有：

$$q = Q \cdot h(y,X)$$

把渠道的输水损失折算为输水成本：

$$C_4 = \frac{C_S[1-h(y,X)]}{h(y,X)}$$

即在距水源 y 处的成本 $P(y)$ 为：

$$P(y) = \frac{C_S}{h(y,X)}$$

对于输送水资源的渠道投资或维修投入 X，有一资本性成本 d，有 $d=\alpha X$，α 为投资报酬率，假设它为一常数。如果按输水距离和输水量来分摊，免去其复杂的计算，令有一关系 $C_6 = g(X,y)$，并有以下性质：

$$\partial g/\partial X \geqslant 0\text{，}\ \partial g/\partial y \geqslant 0$$

其含义是：在其他条件不变时，投资越大，资本性成本也就越大；距离越远，资本性输送成本越高。监测用水量成本不随距离发生变化，设其为一常数，在后面的分析中，为简明起见将略去此项。综上，得灌溉系统成本函数 $W(y,X)$。

$$W(y,X) = \frac{C_S}{h(y,X)} + g(y,X)$$

对其求偏导，有：

$$\partial W/\partial y = -\frac{C_S}{[h(y,X)]^2}\cdot \partial h/\partial y + \partial g/\partial y$$

$$\partial W/\partial X = -\frac{C_S}{[h(y,X)]^2}\cdot \partial h/\partial X + \partial g/\partial X$$

从前面给出的函数性质，显然有 $\partial W/\partial y \geqslant 0$，即灌溉系统水资源成本随灌溉距离而增加。$\partial W/\partial X$ 的前一项 $\partial W/\partial y = -\frac{C_S}{[h(y,X)]^2}\cdot \partial h/\partial y$ 为负，增加对灌溉渠道的投入可减少输送途中的水损失，降低水资源的成本，增加投入也增加了资本性成本。

(2) 农户的用水行为模型：

在空间差异的水资源价格条件下，农户通过控制用水量 q，节水投入 T，或开辟其他水源来使其收益最大化。此处仅讨论没有其他水源的情形。设农户具有生产函数 $F=F(q,T)$，产品的价格向量为 P，节水投入的价格向量为 V，位于距源头 y，农户的决策模型为：

$$\max_{q,T} PF(q,T) = [C_S/h(y,X) + g(y,X)]\cdot q - VT$$

最优化的一阶条件为：

$$P\cdot \partial F/\partial q = C_S/h(y,X) + g(y,X) \qquad \text{(a)}$$

$$P\cdot \partial F/\partial T = V \qquad \text{(b)}$$

即农户用水量调整到水资源的边际产品收益等于水资源的价格时，节水性投入的边际产品收益等于投入的价格时，为最优用水决策。根据最优化一阶条件方程(a)和(b)可知：农户在节水性投入与使用水资源的均衡点为两种投入的边际收益的比值等于两种投入的价格比，分别对 y 求偏导数有：

$$pF_{qq}q' + pF_{qT}T' = \partial W/\partial y$$

$$pF_{qT}T' + pF_{TT}T' = 0$$

(3) 供水行为模型：

供水者对系统的投入是根据利润最大化进行决策的。与水资源充分利用相关密切的是输送农业水资源的渠道投入，渠道的投入减少了水资源的输送损失，也增加了投入的成本，渠道投入决策的最优化模型是：

$$\max_{L,X}\int_0^L W(y,X)\cdot Q\cdot h(y,X)\mathrm{d}y - UX$$

式中，L 代表渠道长度，U 为渠道投入品价格向量。$W(y,X)\cdot Q\cdot h(y,X)$ 是按点影子价格计价时的收益函数。最优化的一阶条件为：

$$\partial[W(y,X)\cdot Q\cdot h(y,X)]/\partial X = U \qquad (\text{a}_1)$$

$$\partial[W(y,X)\cdot Q\cdot h(y,X)]/\partial y = 0 \qquad (\text{b}_1)$$

式中，方程(a_1)说明渠道的投入品价格等于渠道投入的输水收益的边际值。分解有：$U = Q\cdot h(y,X)\cdot\partial W/\partial X + Q\cdot W(y,X)\cdot\partial h/\partial X$ 增加渠道投入具有两种效益：改变影子价格，提高输送水资源效率。两者均可能影响到渠道投入的边际收益；方程(b_1)说明了渠道长度的均衡条件。当渠道长度的扩展带来的边际收益为零时，投资者不再延伸其长度，这可以确定灌溉系统的大小。分解式(b_1)可得：$Q\cdot h(y,X)\cdot\partial W/\partial y - Q\cdot W(y,X)\cdot\partial h/\partial y = 0$。

粮食总产多年平均增产率的计算公式

党安荣，阎守邕，周艺：中国粮食生产发展的时序变化研究．地理研究，1998，17(3)

(1) 极差平均增产率：

$$R_1 = \frac{X_n - X_1}{nX_1}\times 100\%$$

(2) 平均逐年增产率：

$$R_2 = \left[\exp\frac{1}{n}\ln(X_n/X_1) - 1\right]\times 100\%$$

(3) 累计平均增产率：

$$R_3 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{X_{i+1}-X_i}{X_i}\right)\times 100\%$$

(4) 平均绝对增产率：

$$R_4 = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{m}\left(\frac{X1_{j+1}-X1_j}{X1_j}\right)\times 100\%$$

式中，$X = \{X_1, X_2, \cdots, X_i, \cdots, X_n\}$为粮食总产量时间序列数据；$X1 = \{X1_1, X1_2, \cdots X1_j, \cdots, X1_m\}$为 X 的绝对增产子序列。

(5) 综合平均增产率：

$$R_5 = \frac{1}{n}\left(\sum_i \gamma_i + \sum_j \delta_j - \sum_k \beta_k\right)$$

$$(i < n,\quad j < n,\quad k < n)$$

$$\gamma_i = \frac{X_{i+1}-X_i}{X_i}\times 100\%$$

$$(X_{i-1} > X_i,\quad X_{i-1}\text{为绝对增产})$$

$$\omega_i = \frac{X_{j+1}-X_j}{X_j}\times 100\%$$

$$(X_{j+1} > X_j,\quad X_{j+1}\text{为相对增产})$$

$$\alpha_k = \frac{X_k - X_{k+1}}{X_k}\times 100\%$$

$$(X_{k+1} > X_k,\quad X_{k+1}\text{为绝对减产})$$

$$\delta_j = \rho\cdot\omega_j$$

$$(0 < \rho < 1,\ \text{通常}\ \rho = 0.5 \sim 0.8)$$

$$\beta_k = 100\alpha_k/(100 - \alpha_k)$$

式中，ω 为相对增产率；ρ 为 ω 的贡献系数；δ 为 ω 的实际增产率；α 为减产率；β 为 α 的补偿增产率。

小流域系统环境人口容量分析与评价模型

李建牢：黄河中游小流域系统环境人口容量分析与评价．水土保持通报，1998，18(3)

(1) 小流域系统的环境容纳量 E_C 模型：

$$E_C = F[R(t), M(t), L(t), S(t)]$$

式中，R 为小流域自然资源参数；M 为小流域社会生产力水平；L 为小流域平均人口消费水平；S 为小流域系统内部平衡稳定系数。

(2) 人口承载力指数 K 模型：

$$K = \frac{\sqrt{C_F\cdot C_E}}{P_t}$$

$$C_F = \frac{R\cdot M_F}{L_F}$$

$$C_E = \frac{R\cdot M_E}{L_E}$$

式中，R 为土地资源面积；M_F、M_E 分别为单位面积土地粮食和经济产值的生产水平；L_F、L_E 分别为人均粮食和经济消费水平；P_t 为 t 时段人口实际数量。

(3) 系统平衡稳定系数 F 模型：

$$F = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{n} F_i}$$

$$F_i = \frac{\sum P_i}{\sum q_i}$$

$$(i = 1, 2, \cdots, n)$$

式中，$\sum P_i$ 为第 i 种资源可提供量之和；$\sum q_i$ 为第 i 种资源的总需求量；$F_i > 1$时，令$F_i = 1$。

坝坡开发利用可行性论证

尹增斌，周玉珍：淤地坝坝坡开发利用及其防护措施. 水土保持通报，1998，18(3)

(1) 稳定安全系数 F_s 模型：

$$F_s = \frac{\tau_f LR}{Wd} > 1$$

式中，τ_f 为土的抗剪强度；L 为滑弧长度；R 为滑弧半径；d 为土体重心绕圆心转动的力臂；W 为滑动土体所受的重力。

(2) 渗流量 q 模型：

$$q = kiA$$
$$k = 2d_{10}^2 e^2$$
$$i = h/L$$

式中，A 为垂直与渗透方向土的截面积；d_{10} 为有效粒径；e 为土的孔隙比；h 为渗流水头；L 为渗径长度。

灌溉定额模型

晋华：豫西山地农业灌溉与水集流系统设计研究. 资源科学，1998，20(3)

$$M = W_E - W_p - W_g \pm W_t$$

式中，M 为灌溉定额；W_E 为作物生育期的田间需水量；W_p 为作物生育期内的有效降水量；W_g 为作物生育期内可以利用的地下水量；W_t 为作物生育期始末土壤计划层含水量的变化。

效益指标动态模型

林洪孝：山区农业综合开发实施与效果分析. 水土保持通报，1998，18(4)

$$R = \frac{B}{K+C} = \frac{\sum_{t=1}^{n} B_t (1+i_0)^{-t}}{K_C + \sum_{t=1}^{n} C_t (1+i_0)^{-t}}$$

式中，R 为效益费用比；B 为折算后的年效益总值；C 为折算后的年运行管理费总值；K 为基准点的投资；B_t 为 t 年的年效益；C_t 为 t 年的年运行管理费。

界区截水沟末端的设计流量 Q_p 模型

朱建强，蒋允静：膨胀土地区土坎梯地的规格化研究. 水土保持通报，1998，18(4)

$$Q_P = 1.67 \times 10^{-5} \phi I_P F$$

式中，ϕ 为暴雨径流系数；I_P 为设计雨强；F 为集水面积。

节水农业作物布局空间决策模型

李军，刘静航：华北平原节水农业作物布局空间决策系统研究. 资源科学，1998，20(4)

(1) 空间型决策方案生成模型——网格综合适宜度模型：

$$Sk = \sum_{i=1}^{n} F_{ki} C_{ki}$$

(2) 决策方案综合评价模型：

$$F = \frac{1}{m}\left[(a \cdot f_y)^2 + (b \cdot f_m)^2 + (c \cdot f_p)^2 + (d \cdot f_e)^2 + (k \cdot f_q)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

式中，F 为方案综合满意度值；m 为评价指标个数；a，b，c，d 和 k 分别为各项评价指标的权重值；f_y，f_m，f_p，f_e 和 f_q 分别为各项评价指标的满意度。

小流域治理综合效益评价模型

李智广，李锐：小流域治理综合效益评价方法刍议. 水土保持通报，1998，18(5)

(1) 加权综合指数法评价模型：

$$A = \sum_{i=1}^{n} W_i X_i$$

$$\sum_{i=1}^{n} W_i = 10 \quad (0 < W_i < 10)$$

式中，A 为治理效益；W_i 为第 i 指标的权重；X_i 为第 i 指标的得分值。

(2) 加乘综合指数法评价模型：

$$B = \prod_{i=1}^{3}\left(\sum_{j=1}^{x} B_{ij}\right)$$

$$B_{ij} = \sum_{i=1}^{3} W_i X_i$$

式中，B_{ij} 为第 i 类指标第 j 子指标的得分；x 为第 i 类指标子指标的数目。

(3) 关联度分析法评价模型：

$$\xi_{i(k)} = \frac{\Delta\min + R\Delta\max}{\Delta_{i(k)} + R\Delta\max}$$

$$(i=1,2,\cdots,m;k=1,2,\cdots,n)$$

式中，$\Delta_{i(k)}=\left|X_{i(k)}-X_{0(k)}\right|$；$\Delta\min=\min_i\left[\min_k \Delta_{i(k)}\right]$；$\Delta\max=\max_i\left[\max_k \Delta_{i(k)}\right]$；$\xi_{i(k)}$ 为关联系数。

荒地资源开发对于粮食的影响模型

任国柱，蔡玉梅：中国耕地后备资源开发的特点和对策．资源科学，1998，20(5)

$$W_i=S_i\times M_i\times P_i\times R_i$$

式中，W_i 为第 i 年度某地区耕地后备资源开发导致粮食总产量的净增减；S_i 为第 i 年度某地区耕地中新开荒地数量；M_i 为第 i 年度某地区复种指数；P_i 为第 i 年度某地区粮食播向备产；R_i 为第 i 年度某地区粮食播种面积占农作物总播种面积比重。

主要农业资源利用效率模型

谢高地，齐文虎，章予舒等：主要农业资源利用效率研究．资源科学，1998，20(5)

1．理论模型

(1) 资源效率 Rec 模型：

$$Rec=\frac{E_0-N_0}{R_i}$$

式中，R_i 为资源消耗量或占有量；E_0 为有效价值产出；N_0 为伴随该资源消耗利用过程产生的负面效应价值。

(2) 资源利用效率系数 $Ruec$ 模型：

$$Ruec=\frac{1}{Rec}$$

2．主要农业资源的利用效率

(1) 耕地资源消耗系数 $Clre$ 模型：

$$Clre=\frac{Fla\cdot 10000}{O_g}$$

式中，Fla 为耕地播种面积；O_g 为粮食总产量。

(2) 农业淡水资源消耗系数 $Awec$ 模型：

$$Awec=\frac{Awua\times Awuc}{O_g}$$

式中，$Awua$ 为不同国家和地区每年淡水资源开采量；$Awuc$ 为农业用水比例；O_g 为粮食总产量。

(3) 化肥的消耗系数 Fec 模型：

$$Fec=\frac{Faua}{O_g}$$

式中，$Faua$ 为年度化肥投入量；O_g 为粮食总产量

非农业建设占用耕地预测模型

张凤荣，薛永森，鞠正山等：中国耕地的数量与质量变化分析．资源科学 1998，20(5)

(1) 人口预测模型：

$$P=P_0(1+K)^n$$

式中，P 为预测期末人口数；P_0 为预测基期人口数；K 为预测期间人口自然增长率；n 为预测年限。

(2) 非农业建设占用耕地预测模型：

$$S=(P-P_0)B\frac{3}{2000}G/15$$

式中，S 为预测期新增居民点占用耕地面积；B 为人均居民点建设用地标准；G 为新增居民点用地 $(P-P_0)B\frac{3}{2000}$ 中占用耕地占总用地面积的百分数。

农业科技进步贡献率计算模型

冯浩，吴普特：黄土高原国家攻关试区农业科技进步贡献率的分析与评价．水土保持通报，1998，18(6)

$$\delta=\frac{Y_t-Y_0}{Y_0}-\frac{\alpha(K_t-K_0)}{K_0}-\frac{\beta(L_t-L_0)}{L_0}-\frac{\gamma(A_t-A_0)}{A_0}$$

式中，Y_0,K_0,L_0 和 A_0 分别为基年的农业总产值、物质费用、农业劳动力数和耕地面积；Y_t、K_t、L_t 和 A_t 分别为计算年的农业总产值、物质费用、农业劳动力数和耕地面积。

粮食灾损量的估计模型

郑景云，黄金火：我国近40年的粮食灾损评估．地理学报，1998，53(6)

$$Y_d=Y_{t-1}+(\hat{y}_p-y_{t-1})S_t+y_t(S_t-S_{t-1})-Y_t$$

式中，Y_d 为因农业自然灾害而造成的粮食损失量(简称粮食灾损量)；$\hat{y}_p$ 为粮食产量随时间变化的自然增长力；y_t，y_{t-1} 分别为当年和前一年粮食播种面积单产；S_t，S_{t-1} 分别为当年和前一年粮食播种面积；Y_t，Y_{t-1} 分别为当年和前一年粮食总产量。

小流域泥沙来源及其动态变化的 ^{137}Cs 法

文安邦，张信宝：黄土丘陵区小流域泥沙来源及其动态变化的 ^{137}Cs 法研究．地理学报，1998，53(增刊)

(1) 取样剖面处的土壤流失量：

$$X = Y(1-h/H)^{N-1963}$$

式中，X 为 ^{137}Cs 面积浓度($Bq \cdot m^{-2}$)；Y 为 ^{137}Cs 本底值($Bq \cdot m^{-2}$)；H 为犁耕层深度(=15 cm)；h 为土壤年流失厚度(cm)；N 为取样年份。

(2) 沟间地、沟谷裸坡侵蚀相对产沙量的混合模式：

$$C_d = C_m \cdot f_m + C_g \cdot f_g$$

式中，C_d 为沉积泥沙来源于梁峁坡和沟谷裸坡的 ^{137}Cs 含量($Bq \cdot kg^{-1}$)；C_m 为沟间地产出泥沙的 ^{137}Cs 含量($Bq \cdot kg^{-1}$)；C_g 为沟谷裸坡产出泥沙的 ^{137}Cs 含量($Bq \cdot kg^{-1}$)；f_m 为沟间地相对产沙量(%)；f_g 为沟谷裸坡相对产沙量(%)；$f_m + f_g = 0.91$。

杂草密度预测模型

Wallinga J, Grasman J, Groeneveld R M W et al：杂草密度预测——误差随预测时间间隔增大和杂草控制长期预测的应用　The Journal of Applied Ecology, 1999, 36

(1) 冬小麦和糖用甜菜的两年作物轮作中的 S.媒介动力学：

$$N(t) = \begin{cases} aN(t-1) & (r(t-1)=0) \\ bN(t-1) & (r(t-1)=1) \end{cases}$$

式中，冬小麦的杂草控制最优；N 是冬小麦中的 S.媒介密度；t 表示时间(以两年为一个时间阶段)；a 是当杂草未被控制时的杂草种群的相对生长率；b 是当杂草已被控制时的杂草种群的相对生长率；r 是表征冬小麦中的杂草是已被控制(r=1)或者未被控制(r=0)的二元控制变量。

(2) 最终的冬小麦产量为：

$$Y(t) = \begin{cases} Y_{max} - cN(t) & (r(t)=0) \\ Y_{max} & (r(t)=1) \end{cases}$$

式中，Y 是冬季产量；Y_{max} 表示杂草已被控制时的农作物产量；c 表示杂草未被控制时每棵杂草植物造成的产量损失。

(3) 每年冬小麦的收入：

$$R(t) = \begin{cases} pY(t) & (r(t)=0) \\ pY(t)-h & (r(t)=1) \end{cases}$$

式中，R 是每年的收入；p 是小麦的价格；h 是杂草控制的成本。

(4) 受最优控制论影响的 S.媒介种群动力学可以用下式有效的描述：

$$N(t) = \begin{cases} aN(t-1) & (N(t-1) \leqslant K) \\ bN(t-1) & (N(t-1) > K) \end{cases}$$

式中，K 是应用杂草控制的密度临界值。

(5) 控制论中误差对作物产量的影响：

$$\frac{dY_A}{dK} = \frac{-c(1-b)}{\ln a - \ln b}$$

式中，Y_A 是预期的每年作物产量。

农业水资源供需状况评价方法

任鸿遵，于静洁，林耀明：华北平原农业水资源供需状况评价方法　地理研究, 1999, 18(1)

(1) 权重的确定步骤：

1) 建立判断矩阵：

A	B_1	B_2	$\cdots$	B_n
B_1	b_{11}	b_{12}	$\cdots$	b_{1n}
B_2	b_{21}	b_{22}	$\cdots$	b_{2n}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
B_n	b_{n1}	b_{n2}	$\cdots$	b_{nn}

2) 权重计算：

$$W_i = \overline{W_i} / \sum_{i=1}^{n} W_i$$

式中，$\overline{W_i} = \sum_{j=1}^{n} \overline{W_{ij}}$，$\overline{W_{ij}} = b_{ij} / \sum_{i=1}^{n} b_{ij}$。

3) 一致性检验：

$$CR = CI / RI$$

式中，$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1}$，$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{(AW)_i}{W_i}$，$A$ 为判断矩阵，n 为矩阵阶数，W 为权重向量；λ_{max} 为最大特征值；RI 为随机一致性指标。

(2) 水资源供需状况综合评价模型：

$$G = \sum W_i a_i$$

式中，G 为综合评价值；W_i 为各要素的权重；a_i 为各要素相应的等级系数。

滇东北山区坡耕地土壤流失方程

杨子生：滇东北山区坡耕地土壤流失方程研究 水土保持通报，1999，19(1)

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

式中，A 为单位面积多年平均土壤流失量；R 为降雨侵蚀力因子；K 为土壤可侵蚀性因子；LS 为地形因子，L 为坡长，S 为坡度；C 为作物经营管理因子；P 为水土保持措施因子。

温度对玉米生长和发育综合影响的评价模型

孙玉亭、孙燕梅、姜丽霞：温度对玉米生长和发育综合影响的评价模型 资源科学，1999，21(1)

(1) 光合作用的物质累积：

1) 作物群体光合作用模型：

$$\Phi_j = \Phi_0 \cdot ak_j \cdot f(r)_j \cdot f(t)_j$$
$$\Phi_0 \cdot ak_j = \eta_i \cdot \Theta_i$$

式中，Φ_j 表示现实环境条件下的光合作用强度；Φ_0 表示现实光照条件下及最佳水、热条件下的光合作用强度；ak_j 为光合作用系数，它随作物生育过程而变化；$f(r)_j$、$f(t)_j$ 分别为水分和热量影响的函数，即水分和温度订正系数；η_i 为第 i 时刻的光能利用系数；Θ_i 为第 i 时刻的光合有效辐射量。

2) 最终产量 Y 模型：

$$Y = \frac{k}{q} \cdot \sum_{i=1}^{l} \eta_i \cdot \Theta_i \cdot f(t)_j \cdot f(r)_j$$

式中，k 为经济利用系数；q 为植物发热量。

(2) 呼吸消耗 R_i 模型：

$$R_i = c_1 \cdot W_i \cdot f_1(t) + c_2 \cdot \Phi_i \cdot f_2(t)$$

式中，c_1 为维持机体的呼吸消耗系数；W_i 为土壤含水量；$f_1(t)$ 为温度对维持机体的呼吸消耗的影响函数；c_2 为对与光合作用物质转运即与建立新机体相关联的呼吸消耗系数；$f_2(t)$ 为温度对与光合作用物质转运即与建立新机体相关联的呼吸消耗的影响函数。

(3) 物质转运系数：

任意 $j+1$ 时刻籽粒重 MG_{j+1} 模型：

$$MG_{j+1} = b \cdot \Delta M_j + c \cdot \sum m_{ij}$$

式中，$\sum m_{ij}$ 为第 j 时刻 i 器官(根、茎、叶)干物质总和；ΔM_j 为第 j 时刻光合作用干物质增量；b 为光合作用物质转移系数；c 为旧器官(根、茎、叶)积累的物质向籽粒转运的转运系数。

作物光温生产力模型

于强等：作物光温生产力模型及南方水稻适宜生长期的数值分析，自然资源学报，1999，14(2)

(1) 发育阶段模型：

发育速度(V)的模型：

$$V = \frac{dS_{dv}}{dt} = a_0 + a_1 e^k$$

$$k = -b(L_d - L_{d0}) + a_2 (T - T_{min})^{1+p} (T_{max} - T)^{1+q}$$

式中，S_{dv} 为发育阶段，设移栽期为 0，成熟期为 1。对于逐日平均的模拟模型，T 为日平均温度；L_d 为日长；对于从移栽至成熟的模拟，当抽穗以后感光性为 0，令 L_d=L_{d0}。据有关研究，水稻抽穗之前，T_{max} = 40°C，T_{min} = 12°C；此后分别为 41°C 和 14°C；p、q 为参数。

对于逐日模拟可写为离散形式：

$$S_{dv} = \sum_{1}^{n(t)} V(t)$$

模拟结果表明各发育期对应的 S_{dv} 是稳定的。

(2) 光合作用、呼吸作用模型：

净光合作用速率：

$$P_n = P_g - R_d$$

式中，P_g 是总光合速率，R_d 是暗呼吸速率，分别为生长呼吸和维持呼吸两部分($R_d = R_g + R_m$)，$R_g = r_g P_g$ 与光合作用有关，r_g 为生长呼吸系数，取值为 0.05，R_m 与植株干重及温度有关。

维持呼吸强度与温度的关系一般用温度函数 Q_{10} 表示，即：

$$R_m = Q_{10} \cdot r_{m0} \cdot DM$$

式中，$Q_{10} = 2$，Q_{10} 为 $0.001 \lg CO_2 g^{-1} \cdot h^{-1}$。

作物的光合作用有最低(T_{min})、最适(T_{op})和最高(T_{max})的三基点温度。对于光温影响的光合作用模型的一般形式为：

$$P_g(Q_{PAR}, T) = F(T) F(Q_{PAR})$$

式中，$F(T)$ 为温度函数，可表达为

$$F(T)=\begin{cases}\exp\dfrac{-K_t(T_{op}-T)^2}{(T-T_{min})(T_{max}-T)} & (T_{min}<T<T_{max})\\ 0 & (\text{其他})\end{cases}$$

三基点温度随生育阶段变化，对于杂交水稻，一般T_{min}在10～12°C，T_{op}在24.5～26.5°C，T_{max}在40～44°C。

(3) 叶面积指数和衰老模型：

叶面积指数随生育期和干物重变化的统一模型：

$$I_{la}(t)=\frac{(1+B)DM(t)/DM_0(t)}{1+B\cdot DM(t)/DM_0(t)}\times\frac{I_{la_m}}{1+\exp(c_1+c_2t+c_3t^2)}$$

式中，$I_{la}(t)$、$DM(t)$和$DM_0(t)$分别是生育期t时叶面积指数、实际干物质重和标准干物质重；其他为拟合参数；I_{la_m}的意义是标准情况下的可能最大叶面积指数。

(4) 干物质转换分配模型和衰老模型：

光合产物转化为植物干重的转换系数(F_{cv})随生育期变化，即：

$$F_{cv}=0.7 \qquad (DVS<0.65)$$

$$F_{cv}=0.67 \qquad (DVS>0.65)$$

水稻营养生长期内，根冠比为0.18~0.12，详细表达为：

$$r_{rs}=0.1 \qquad (DVS<0.65)$$

$$r_{rs}=0.05 \qquad (DVS>0.65)$$

当日地上部的干物质增量为：

$$DM_s=F_{cv}\cdot P_c/(1+r_{rs})$$

植株叶片的衰老表现为蛋白质的降解，叶绿素减少，*RNA*含量下降，最后原生质膜的选透性丧失。植物生长曲线的*S*曲线大体也反映出后期的衰老，可以用Gomptertz方程描述：

$$\frac{1}{W}\frac{dW}{dt}=\mu_0\exp(-st)$$

式中，W为干物重；μ_0为$t=0$时的相对生长率(RGR_0)；s为经验描述相对生长率的逐渐降低的参数。RGR的降低在营养生长期可归因于生存竞争，在生殖生长期可归因于衰老，可表达为：$\Delta W=\Delta W_0\exp(-st)$；类似地，$P_d$为考虑衰老后的冠层日干物质增长量，可表达为：

$$P_d=P_{gd}\cdot\exp[-s(DVS-DVS_0)]$$

农耕地地价评估公式

倪绍祥，秦昆，蒋建军等：农耕地地价评估方法的探讨　地理学报，1999，54(2)

(1) 参照田块地价的测算公式：

$$P=(O-I)/Sr$$

式中，P为参照田块的地价；O为年总收入；I为年总支出；S为田块面积；r为还原率。

(2) 评估田块总分值的计算公式：

$$V=(c+d+e+f+g+h+i+j+k)\times 0.54+(l+m+n+o)\times 0.32+(p+q+r)\times 0.14$$

式中，V为某一评估田块的总分值；c~k,l~o和p~r分别为该评估田块的土壤状况、农田基本建设状况和农田区域状况三项因素的各个因子的赋分。

(3) 农耕地区域平均分值地价的测算公式：

$$K=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}P_i/F_i$$

式中，K为平均分值地价；P_i为参照田块的地价；F_i为参照田块的总分值；n为农耕地区域的参照田块数。

(4) 评估田块地价的测算公式：

$$P=VK$$

式中，P为某评估田块的地价；V为该评估田块的总分值；K为该评估田块所在农耕地区域的平均分值地价。

生态经济分区的距离系数模型

王礼先，高甲荣，谢宝元等：密云水库集水区生态经济分区研究　水土保持通报，1999，19(2)

$$D_{ij}=\left(\sum_{k}^{m}|X_{ij}-X_{jk}|^q\right)^{1/q}$$

式中，D_{ij}为i、j两点的距离系数；X_{ij}为第i点第k因子的值；X_{jk}为第j点第k因子的值；m为因子的个数；q为指数，式中，q=2。

农田林网经营模式效益评价

张纪林，季永华，王建等：沿海农田林网建设关键技术的经济学择优　自然资源学报，1999，14(3)

(1) 几种收益指数：

1）农作物增产收益（CY）：

$$CY_{jt}=\Delta SY_{jt}\cdot CP_j+\Delta AY_{jt}\cdot AP_j$$

式中，CY_{jt} 为第 t 年第 j 种林网的农作物增产收益；ΔSY_{jt} 为第 t 年第 j 种林网防护效果的夏熟作物增产量；CP_j 为第 j 种林网夏熟作物的价格；ΔAY_{jt} 为第 t 年第 j 种林网防护效果的秋熟作物增产量；AP_j 为第 j 种林网秋熟作物的价格。

2）薪材收益（WY）：

$$WY_{jt}=[BW_{jt}+SW_{jt}+TW_{jt}(1-70\%)]\cdot WQ_j/CQ_i\cdot CP_i$$

式中，WY_{jt} 为第 t 年第 j 种林网的薪材收益；BW_{jt}、SW_{jt}、TW_{jt} 为第 t 年第 j 种林网林木枝、皮、干的干重；WQ_j 第 j 种林网的薪材热值；CQ_i 和 CP_i 分别为第 i 种树种折合标准煤的热值和价格。

3）商品材收益（TY）

$$TY_{jt}-70\%V_{jt}\cdot TP_j$$

式中，TY_{jt} 为第 t 年第 j 种林网的商品材收益；V_{jt} 为第 t 年第 j 种林网的木材蓄积量；TP_j 为第 j 种林网的商品材价格。

4）果品收益（FY）

$$FY_{jt}=FW_{jt}\cdot FP_{jt}$$

式中，FY_{jt} 为第 t 年第 j 种林网的果品收益；FW_{jt} 为第 t 年第 j 种林网的果品产量；FP_{jt} 为第 t 年第 j 种林网的果品的价格。

(2) 评价指标及方法：

1）社会贡献率：

$$SCR_j=\frac{\sum_{t=1}^{n}(CI_{jt}+BT_{jt})\cdot(1+i)^{-t}}{\sum_{t=1}^{n}CO_{jt}\cdot(1+i)^{-t}}\times 100\%$$

式中，SCR_j 为第 j 种林网的社会贡献率；BT_{jt} 为第 t 年第 j 种林网上交给国家财政的税金；CI_{jt} 和 CO_{jt} 为第 t 年第 j 种林网的现金流入量和现金流出量；i 为贴现率

2）社会积累率：

$$SAR_j=\frac{\sum_{t=1}^{n}BT_{jt}\cdot(1+i)^{-t}}{\sum_{t=1}^{n}(CI_{jt}+BT_{jt})\cdot(1+i)^{-t}}\times 100\%$$

式中，SAR_j 为第 j 种林网的社会积累率。

旱作地膜带田的集水调水效应水分平衡模式

邓振镛，仇化民：旱作小麦-玉米垅种沟盖地膜带田集水调水与增产效应研究．自然资源学报，1999，14(3)

(1) 旱作地膜带田的集水调水效应可用下列水分平衡模式表示：

$$d_g l_g+d_t l_t+d_r(n_2/n_1)\ l_g=K_a T_e$$

式中，$d_g l_g$ 为作物生育降水量在 l_g 所形成的土壤含水量；$d_T l_T$ 为作物播种前降水量在 l_t 所形成的土壤含水量；$d_r(n_2/n_1)\,l_g$ 是带间调集的土壤含水量；T_e 作为生物生育期潜在的蒸散量；K_a 为作物系数；d_g、d_t、d_r 为收熵系数；n_1、n_2 是带田覆膜和不覆膜的面积。

(2) 应用旱作地膜带田集水调水方程

$$\sum_{1}^{n}S_c=C_r\cdot F_m\sum_{1}^{n}R$$

式中，S_c 为带田集水调水量；F_m 为调水收熵系数；R 为生育期降水量；C_r 为集水比。

农业水资源的供需模拟模型

李庆朝，张二勋：黄淮海平原农田灌溉模式及其效益的研究——以山东省聊城地区为例．地理研究，1999，18(3)

$$H_i=\alpha\cdot P+\beta\cdot H_s+\gamma\cdot H_G$$

式中，H_i 为作物的需水量；α 为降水有效利用系数；P 为降水量；β 为引灌地表水有效利用系数；H_s 为地表毛引灌水量；γ 为开采地下水的有效利用系数；H_g 为地下水开采量。

渠道工程体系费用、能耗及占用土地面积计算

李庆朝，张二勋：黄淮海平原农田灌溉模式及其效益的研究——以山东省聊城地区为例。地理研究，1999，18(3)

(1) 扬水泵站、桥、涵、闸工程基建投资费 C_{ct}：

$$C_{ct}=(C_{br}+C_{con}+C_{ca})\cdot Y_{xx}$$

式中，C_{br}、C_{con} 和 C_{ca} 分别为桥、涵、闸投资费用；Y_{xx} 为考虑了银行利率，在 Y_{nt} 年后的金额数，$Y_{xx}=(1+ff)^{Y_{nt}}$，ff 为银行利率，Y_{nt} 为计算年限。

(2) Y_{nt} 年限内分支渠及农渠全部费用 C_{ss1}：

$$C_{ss1}=C_{stt}(1)+C_{stt}(2)$$

式中，$C_{stt}(1)$、$C_{stt}(2)$ 分别表示分支渠及农渠全部费用。

(3) 耗油量 O_{ls1} 和耗电量 E_{ls1}：

$$O_{ls1} = O_l(1) + O_l(2)$$

$$E_{ls1} = E_l(1) + E_l(2)$$

式中，$O_l(1)$、$O_l(2)$ 分别为分支渠及农渠耗油量；$E_l(1)$、$E_l(2)$ 分别为分支渠及农渠耗电量。

(4) 渠道工程体系占用土地面积 A_{ss}：

排灌合一时：

$$A_{ss}=\sum_{i=1}^{2} S_{ss}(i)\cdot L_l(i)$$

式中，$S_{ss}(i)$ 为排灌合一渠道上口宽；$L_l(i)$ 为渠道长度

排灌分设时：

$$A_{ss}=\sum_{i=1}^{2} S_s(i)\cdot L_l(i)$$

式中，$S_s(i)$ 为排灌分设渠道上口宽。

地下暗管灌溉工程体系引灌费用计算公式

李庆朝，张二勤：黄淮海平原农田灌溉模式及其效益的研究——以山东省聊城地区为例 地理研究，1999，18(3)

(1) 引灌费用 C_{ss2} 计算：

$$C_{ss2} = C_{pc} + C_{pcr}$$

式中，C_{pc} 为地下暗管投资费用；C_{pcr} 为维修管理费用。

(2) 引灌耗油量 O_{ls2} 及耗电量 E_{ls2}：

$$O_{ls2} = O_{la}(1) + O_{la}(2)$$

$$E_{ls2} = E_{la}(1) + E_{la}(2)$$

式中，$O_{la}(i)$、$E_{la}(i)(i=1,2)$ 分别为不同级别的暗管引灌耗油量或耗电量。

引灌费用、能耗及占用土地计算模型

李庆朝，张二勤：黄淮海平原农田灌溉模式及其效益的研究——以山东省聊城地区为例 地理研究，1999，18(3)

(1) 引灌费用 C_{ss3} 计算：

$$C_{ss3} = C_{ss2} + P_{sco} + P_{ser}$$

式中，P_{sco} 为喷灌系统建设投资费用；P_{ser} 为喷灌运转管理维修费。

(2) 引灌耗油量 O_{ls3} 和耗电量 E_{ls3}：

$$O_{ls3} = O_{lp}(1) + O_{lp}(2)$$

$$E_{ls3} = E_{lp}(1) + E_{lp}(2)$$

式中，$O_{lp}(i)$、$E_{lp}(i)(i=1,2)$ 分别为不同级别的喷灌耗油量或耗电量。

井灌费用及能耗计算模型

李庆朝，张二勤：黄淮海平原农田灌溉模式及其效益的研究——以山东省聊城地区为例 地理研究，1999，18(3)

(1) 机井建设投资费用 C_c：

$$C_c = N_{well}\cdot(C_d + C_t - C_p + C_o)\cdot Y_{xx}$$

式中，N_{well} 为规划布机数；C_d 为钻井、成井投资；C_t 为输水设备费；C_p 为机泵配套费；C_o 为其他如井屋等建设费用。

(2) 机井抽水费用 C_{cw}：

$$C_{cw} = T\cdot G_{wc}\cdot N_{well}$$

式中，T 为机井抽水历时；G_{wc} 为机井开机抽水每小时的用油费或用电费。

(3) 机井的管理维修费用 C_r：

$$C_r = N_{well}\cdot W_{mr}$$

式中，W_{mr} 为每眼井每年维修管理费。

(4) NTY 年内机泵折旧损失费 C_{pr}：

$$C_{pr} = N_{well}C_p \times \sum_{i=1}\left\{\left[(1-F_k)^{i-1}F_k\right](1+ff)^{NTY-i}\right\}$$

式中，F_k 为机泵年损耗率。

(5) 井灌的费用 C_{gg}：

$$C_{gg} = C_c + C_r + C_{pr} + C_{gw}$$

(6) 井灌的耗油量 O_{lgg} 和耗电量 E_{lgg}：

$$O_{lgg} = T\cdot G_{wo}\cdot NTY\cdot N_{well}$$

$$E_{lgg} = T\cdot G_{we}\cdot NTY\cdot N_{well}$$

式中，G_{wo}，G_{we} 分别为开机抽水每小时的耗油和耗电量。

非饱和土壤水扩散率 $D(\theta)$ 模型

朱首军，丁艳芳：渭北旱塬农林复合生态系统土壤水扩散率研究 水土保持通报，1999，19(3)

$$D(\theta)=-\frac{1}{2}\frac{\Delta\lambda}{\Delta\theta}\sum\lambda\Delta\theta$$

$$\lambda=xt^{-1/2}$$

式中，θ 为容积含水量；t 为时间；x 为水平距离。

草场生态经济效益现状分析模型

全之易：陕北草场生态经济发展途径探讨．资源科学，1999，21(3)

(1) 协调指数 Y 模型：

$$Y=\left[\frac{27x_1x_2x_3}{\left(\sum x_i\right)^3}\right]^4$$

(2) 综合效益指数模型：

$$Z=\alpha x_1+\beta x_2+\gamma x_3$$

式中，$x_1、x_2、x_3$ 分别为生态、经济、社会效益；$x_i(i=1,2,3)$；α,β 和 γ 分别为三者效益在评价中所占权重。

治理效益评价模型

李智广：小流域试点治理管理系统设计．水土保持通报，1999，19(4)

$$A=\sum_{i=1}^{n}W_iX_i\qquad\left(0<W_i<10,\ \sum_{i=1}^{n}W_i=10\right)$$

式中，A 为治理效益总值；W_i 为第 i 指标的权重；X_i 为第 i 指标的得分值。

气候生产潜力 Y_C 模型

谢云：中国粮食生产对气候资源波动响应的敏感性分析．资源科学，1999，21(6)

$$Y_C=\left(EC_h\sum Q\right)f(T)f(W)$$

式中，E 为理论光能利用率；C_h 为作物经济系数，表示收获产量占生物产量的比例；$\sum Q$ 为作物生长季内太阳总辐射；$f(T)$ 为温度影响函数；$f(W)$ 为水分影响函数。

土壤水资源 W_{sR} 计算公式

张洪业：土壤水资源研究的两个重要方面及在农业节水中的意义——华北黄河以北平原地区为例．资源科学，1999，21(6)

$$W_{sR}=P-E_w-R_s-R_g$$

式中，E_w 为水面蒸发；R_s 为地表径流；R_g 为地下径流。

水量平衡方程

刘培亮，赵光耀："坡坝地工程"治理模式设计．水土保持通报，2000，20(1)

$$\eta PS_p=\left(P_d-\eta P\right)S_t$$

式中，η 为降水有效系数；P 为多年平均降雨量；S_p 为坡面面积；P_d 为田间需水量；S_t 为梯田面积。

灌区的综合指标值 S

任志远，郭彩玲：区域水土资源开发利用潜力研究——以陕西关中灌区为例．资源科学，2000，22(1)

$$S=\sum_{i=1}^{n}\frac{A_i}{n}+A_0$$

式中，A_i 为指标值；n 为总指标数；A_0 为主导因素指标值。

矿区废弃土地复垦潜力评价模型

何书金，苏光全：矿区废弃土地复垦潜力评价方法与应用实例．地理研究，2000，19(2)

(1) 复垦潜力因子的量化：

$$A'_{ij}=\frac{A_{ij}}{\sqrt{\frac{1}{6}\sum_{j=1}^{6}\left(A_{ij}-\overline{A_{ij}}\right)}}$$

$$\left(i=1,2,\cdots,14;\ j=1,2,\cdots,6\right)$$

(2) 对于存在取值范围，其具体点值指定为：

$$A'_{ij}=\frac{\max\left(A_{ij}\right)+\min\left(A_{ij}\right)}{2}$$

$$\left(i=1,2,\cdots,14;\ j=1,2,\cdots,6\right)$$

(3) 对于本身只有一极大或极小值的级别值，则分别取最大或最小值：

$$A'_{ij}=A_{ij}\qquad\left(i=1,2,\cdots,14;\ j=1,2,\cdots,6\right)$$

(4) 对于级别越高，指标值越大的类型：

$$A'_{ij}=\frac{1}{A_{ij}}$$

式中，A_{ij} 为潜力或限制因子。

渔业资源配额微分对策模型

张德贤，陈中慧，戴桂林等：渔业资源配额微分对策研究．资源科学，2000，22(2)

(1) C.W.Clark 最优捕捞强度模型：

$$\max J(E)=\int_0^{+\infty}[P-c(x)]Exe^{-\delta t}\mathrm{d}t$$

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=F(x)-Ex$$

$$x_0>0$$

式中，$x(t)$ 为 t 时期鱼种资源总量；$F(x)$ 为自然增长率；E 为渔业公司捕捞努力量；$c(x)$ 为单位捕捞成本；P 为鱼的市场价格；$\delta>0$ 为时间偏好率或主观贴现率。

(2) 微分对策捕捞配额模型：

对渔业公司 I 而言，最优捕捞模型：

$$\max J(E_1,\cdot)=\int_0^{+\infty}[a-b(E_1+E_2)x-c_1(x)]E_1xe^{-\delta t}\mathrm{d}t$$

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=f(x)-E_1x-E_2x$$

$$x_0>0$$

式中，E_1+E_2 为鱼的供给量；E_1，E_2 分别为 I，II 两个公司的捕捞努力量。

农业生态气候系统的模糊动态模型

白永平：西北地区(甘宁青)农业生态气候资源量化与评价．自然资源学报，2000，15(3)

$$\underset{\sim}{S}_r\subset[a,b]$$

$$S(r)=\mu\underset{\sim}{S}_r(r)\to[0,1]$$

式中，$S(r)$ 为气候要素的适宜度模糊子集；$\mu\underset{\sim}{S}_r(r)$ 为模糊子集 $\underset{\sim}{Sr}$ 的隶属函数；$\underset{\sim}{Sr}$ 为气候要素 r 对 S 的隶属度。

1. 如果农业生态气候动态过程的模糊向量表示为：

$$\underset{\sim}{S}_C(t)=\begin{bmatrix}\underset{\sim}{S}_T(t)\\ \underset{\sim}{S}_R(t)\\ \underset{\sim}{S}_I(t)\end{bmatrix}$$

式中，$\underset{\sim}{S}_T(t)$，$\underset{\sim}{S}_R(t)$，$\underset{\sim}{S}_I(t)$ 分别代表气温、相对湿度和日照适宜态。由此便可以给出一组农业生态气候适宜度模型。$\underset{\sim}{S}_C(t)$ 可以是连续过程，也可以是离散过程。

(1) 资源模型：

连续过程：

$$\underset{\sim}{S}_{C_1}(t)=\int_{t\in[0,t_0]}\left\{\frac{1}{3}[S_T(t)+S_R(t)+S_I(t)]/t\right\}\mathrm{d}t$$

离散过程：

$$\underset{\sim}{S}_{C_1}(t)=\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{3}[S_T(t_i)+S_R(t_i)+S_I(t_i)]/t_i$$

资源模型代表热、水、光组合过程对生物生长可能提供的气候资源。

(2) 效能模型：

连续过程：

$$\underset{\sim}{S}_{C_2}(t)=\int_{t\in[0,t_0]}\left\{\frac{1}{3}[S_T(t)\wedge S_R(t)\wedge S_I(t)]/t\right\}\mathrm{d}t$$

离散过程：

$$\underset{\sim}{S}_{C_2}(t)=\sum_{i=1}^{n}[S_T(t_i)\wedge S_R(t_i)\wedge S_I(t_i)]/t_i$$

效能模型反映热、水、光的匹配程度及其对作物生长的适宜程度。

(3)结构模型：

连续过程：

$$\underset{\sim}{S}_{C_3}(t)=\int_{t\in[0,t_0]}\{[\alpha_1S_T(t)+\alpha_2S_R(t)+\alpha_3S_I(t)]/t\}\mathrm{d}t$$

离散过程：

$$\underset{\sim}{S}_{C_3}(t)=\sum_{i=1}^{n}[\alpha_1S_T(t_i)+\alpha_2S_R(t_i)+\alpha_3S_I(t_i)]/t_i$$

2. 根据资源模型和效能模型，可用实测的多年平均气候资料推求农业生态气候资源指数 C_r、效能指数 C_e 和利用系数 K。

(1) 资源指数：

$$C_r=\frac{1}{3}\int_0^{t_0}[S_T(t)+S_R(t)+S_I(t)]\mathrm{d}t$$

或

$$C_r=\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{n}[S_T(t_i)+S_R(t_i)+S_I(t_i)]$$

(2) 效能指数：

$$C_{\mathrm{r}}=\int_{0}^{t_0}\left[S_{\mathrm{T}}(t)\wedge S_{\mathrm{R}}(t)\wedge S_{\mathrm{I}}(t)\right]\mathrm{d}t$$

或：

$$C_{\mathrm{r}}=\sum_{i=1}^{n}\left[S_{\mathrm{T}}(t_i)\wedge S_{\mathrm{R}}(t_i)\wedge S_{\mathrm{I}}(t_i)\right]$$

(3) 利用系数：

$$K=C_{\mathrm{e}}/C_{\mathrm{r}}$$

一致性系数的计算公式

姚治君，林耀明，高迎春等：华北平原分区适应性农业节水技术与潜力．自然资源学报，2000，15(3)

$$C=\frac{12S}{m^2(n^3-n)}$$

式中，C 为一致性系数；S 为专家排序总和的方差和；m 为专家数目；n 为方案数目。

土地生产率综合评价指标

肖裕娣，赵晓娟，香宝：福建省的土地经济评价．资源科学，2000，22(3)

土地生产率 F_{Ai} 模型：

$$F_{\mathrm{Ai}}=\sum_{j=1}^{4}a_{ij}b_j \quad (i=1)$$

式中，a 为权重；b_1 为单位面积农业产值；b_2 为单位面积种植业产值；b_3 为单位面积林业产值；b_4 为单位面积牧业产值。

高寒草地生产潜力模型

杨正礼，杨改河：中国高寒草地生产潜力与载畜量研究．资源科学，2000，22(4)

(1) 草地气候生产潜力模型：

$$Y_t=\frac{30\,000}{1+\exp(1.315-0.119t)}$$

$$Y_r=30\,000\left[1-\exp(-0.000\,664r)\right]$$

式中，Y_t，Y_r 分别为草地温度生产潜力和降水生产潜力；t 为年平均气温；r 为年降水量。

(2) 草地生产潜力 Y_{GS} 模型：

$$Y_{\mathrm{GS}}=Y_{\mathrm{GC}}R_{\mathrm{GS}}$$

式中，Y_{GC} 为草地气候生产潜力；R_{GS} 为草地质量系数。

饱和导水率 K

陈效民、潘根兴、王德建等：太湖地区农田生态环境中土壤饱和导水率研究．水土保持通报，2000，20(5)

$$K=\frac{QL}{A\Delta Ht}$$

式中，Q 为渗透量；L 为渗流路径的直线长度；A 为渗透横断面积；ΔH 为渗流路径始末断面的总水头差；t 为渗透时间。

泥浆泵复垦土壤生产力的定量评价

顾和和，胡振琪，秦延春等：泥浆泵复垦土壤生产力的评价及其土壤重构．资源科学，2000，22(5)

模糊 PI 模型：

$$PI=\sum_{i=1}^{n}(W_ir_i)$$

$$\sum_{i=1}^{n}W_i=1$$

式中，PI 为土壤生产力系数；W_i 为第 i 个影响因素的权重；r_i 为第 i 个影响因素在整个土壤断面上的加权平均适应程度。

光合潜力 P_{f} 指数

周长进，关志华：柴达木盆地农业生产条件及潜力分析．资源科学，2000，22(5)

$$P_{\mathrm{f}}=\frac{666.7\times 10\,000}{C\times 1000}F\cdot E\cdot Q$$

式中，C 为能量转换系数；F 为光能利用率；E 为经济系数；Q 为太阳总辐射。

旱田水分供需平衡模型

董庆超：旱地土壤水分盈亏特征研究．资源科学，2000，22(6)

$$B=P-R+\Delta S-E_0$$

式中，B 为农田水分亏缺量；P 为大气降水量；R 为地表径流量；ΔS 为时段始末土壤蓄水变化量；E_0 为土壤潜在蒸发量。

异常干旱气候事件及其对农业影响评估模式

李翠金：异常干旱气候事件及其对农业影响评估模式．自然资源学报，2000，55(supplement)

(1) 华北地区干旱指数：

$$d = \sum \alpha_i x_i \qquad (i = 1,2,3)$$

式中，d 为某年某干旱时段的干旱指数，它是四省市各级干旱强度(等级)站数(x_i)与相应权重系数(α_i)乘积之和；x_1、x_2、x_3 分别为出现一般干旱、大旱、特大干旱的站数；α_1、α_2，α_3 为相应的权重系数，分别为 1，1.5，2。

(2) 干旱灾害经济损失评估模式：

种植业因旱灾经济损失估算公式为：

$$D = C(a_1 F_1 + a_2 F_2 + a_3 F_3)$$

式中，D 为因干旱种植业造成的经济损失；C 为种植业单位面积产值；F_1，F_2，F_3 分别为减产 10%以上，减产 30%以上，减产 80%以上的灾害面积，a_1，a_2，a_3 分别为减产幅度不同的净减产面积系数。

上式可改写为如下形式：

$$D = C[a_1(y_1 - y_2) + a_2 y_2] \times 10$$

式中，D 为计算的农业旱灾经济损失(亿元)；C 为农业(种植业)单位面积产值(亿元·$10^{-3}hm^{-2}$)；y_1，y_2 分别为前式中，计算所得的干旱受灾面积、干旱成灾面积($10^4 hm^2$)；a_1，a_2 分别为受灾面积、成灾面积的净减产面积系数。

水资源承载力评价模型

惠泱河，蒋晓辉，黄强等：水资源承载力评价指标体系研究．水土保持通报，2001，21(1)

(1) 方案的多目标评价矩阵模型：

$$A = [a_{ij}]^{m \times n}$$

式中，a_{ij} 为第 i 个方案第 j 项指标值；m 为方案数；n 为目标数。

(2) 评价矩阵规范化模型：

$$R = [r_{ij}]^{m \times n}$$

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} a_{ij}^2}} \cdot P_j$$

$$P_j = \begin{cases} 1 \\ -1 \end{cases}$$

式中，P 为该目标效益方向。

土地资源利用结构优化模型

张耀光：辽河三角洲土地资源利用结构与持续利用对策．自然资源学报，2001，16(2)

线性规划模型，就是求解一组变量：

$$X = (X_1, X_2, X_3, \cdots, X_n)^T$$

满足约束条件：

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} X_j \gtrless b_i \qquad (i = 1,2,\cdots,m;\ j = 1,2,\cdots,n)$$

目标函数为：

$$f = \sum_{j=1}^{n} C_j X_j \ \max(\text{或}\min)$$

式中，X_j 为决策变量，即所需优化的土地利用类型；a_{ij} 为经济利益系数或资源消耗系数；b_i 为资源限制量(右端项)，即各类土地资源、劳动力资源、水资源等；C_j 价格系数；m 为约束条件(方程)个数；n 为决策变量个数；$X_j \geq 0$ 为非负约束。

黄土丘陵林区开垦地土壤抗冲性分析模型

查小春，唐克丽：黄土丘陵林区开垦地土壤抗冲性的时间变化研究．水土保持通报，2001，21(2)

(1) 不同流量径流的冲刷性能分析：

水流切应力模型：

$$\tau = \gamma h \sin \alpha$$

式中，τ 为单位面积上的水流切应力；γ 为水的容量；h 为薄层水流的厚度；α 为地表坡度。

(2) 不同侵蚀年限开垦地土壤抗冲性分析：

抗冲性指标 K_W 模型：

$$K_W = \frac{\sum W}{\sum H}$$

式中，$\sum W$ 为该小区年侵蚀模数；$\sum H$ 为年降雨径流深。

中国城乡经济投入占用产出分析模型

刘燕鹏：中国进出口产品完全占用耕地资源研究．资源科学，2001，23(2)

自然资源消耗的完全消耗系数模型：

$$\overline{H} = S(I - A - \hat{a}D)^{-1}$$

式中，$\overline{H}$ 为在固定资产消耗情况下各部门完全占用系数矩阵；S 为直接占用系数矩阵；I 为单位矩阵；A 为直接消耗系数矩阵；$\hat{\alpha}$ 为固定资产折旧率对角矩阵；D 为固定资产直接占用系数矩阵。

土地资源开发的生态效益评价模型

张殿发，卞建民，吴文业：土地资源开发的农业生态效益评价．资源科学，2001，23(2)

(1) 生态结构综合指数 F_s 模型：

$$F_s = \sum_{i=1}^{n} G_i \cdot W_i$$

式中，G_i 为单项指标对应的评价级数；W_i 为相应指标在区域评价中的权重。

(2) 生态功能综合生产效率 F_e 模型：

$$F_e = \frac{\text{耕地生产率}\times\text{光温利用率}\times\text{次级产品土地生产率}}{\text{农田投入商品能}}\times 100\%$$

土地利用的最大似然判别法分类公式

陈浮，陈刚，包浩生等：城市边缘区土地利用变化及人文动力机制研究．自然资源学报，2001，16(3)

$$P_i^{k+1}(\chi_j) = \frac{P_i^{(k)}(\chi_j)\sum_{l=1}^{8} P_l(\chi_j)}{\sum_l [P_i^{(k)}(\chi_j)\sum_l P_l(\chi_j)]}$$

式中，k 为调整次数，i 为相邻的 8 个像元。

粮食生产中的风险分析模型

邓国，王昂生，李世奎等：风险分析理论及方法在粮食生产中的应用初探．自然资源学报，2001，16(3)

(1) 粮食单产分解算法：

$$Y = Y_t + Y_w$$

式中，Y 为粮食单产，Y_t 是反映历史时期生产力发展水平的长周期产量分量，称为趋势产量；Y_w 是受以气象要素、包括市场价格、政治因素在内的短周期变化因子影响的产量分量，称为气象产量，以一年为周期。如采用正交多项式逼近的方法求出趋势产量 Y_t，则气象产量 $Y_w = Y - Y_t$，进一步做相对变换，有 $X = Y_w / Y_t$。

(2) 解析概率密度曲线积分法估算风险概率：

相对气候产量序列的概率密度曲线：

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x'^2}{2}} \left[1 + \sum_{n=3}^{\infty} \frac{c_n H_n(x)'}{\sqrt{n!}}\right]$$

式中，x' 为正规化的相对气象产量；$H_n(x)' = x'^n + \sum_{m=1}^{\frac{n}{2}} (-1)^m (2m-1)!! c_n^{2m} x'^{n-2m}$ 为艾尔米特多项式。

(3) 高斯求积法计算分布函数：

相应于相对气象产量序列的概率密度函数 $f(x)$，其分布函数为：

$$F(x) = \int_{-\infty}^{x} f(t)\mathrm{d}t$$

式中，x 为相对气象产量。

对相对气象序列的概率密度曲线积分，得：

$$F(x) = \int_a^b f(x)\mathrm{d}x \approx \sum_{k=1}^{n} B_k f(x_k)$$

如果节点 x_k 不固定，把它看成是 n 个可自由选择的参数，则上式右端有 $2n$ 个 B_k 和 x_k 待定参数，那么该公式就可能对 $2n-1$ 次多项式精确，如何确定系数 B_k 及结点 x_k，使上式代数精度达到 $2n-1$，这就是构造高斯精度求积公式的基本思路：

首先做变换：

$$x = \frac{b-a}{2}t + \frac{b+a}{2}$$

将原积分化为在区间[-1，1]上的积分，即：

$$\begin{aligned} F(x) &= \int_a^b f(x)\mathrm{d}x \\ &= \frac{b-a}{2}\int_{-1}^{1} f\left(\frac{b-a}{2}t + \frac{b+a}{2}\right)\mathrm{d}t \\ &= \frac{b-a}{2}\int_{-1}^{1} \eta(t)\mathrm{d}t \end{aligned}$$

根据插值求积公式有：

$$\int_{-1}^{1} \eta(t)\mathrm{d}t = \sum_{k=1}^{n} \lambda_k \eta(t_k)$$

$$\lambda_k = \int_{-1}^{1} A_k(t)\mathrm{d}t$$

式中，$A_k(t) = \prod_{\substack{j=1 \\ j\neq k}}^{n} [(t-t_j)/(t_k-t_j)]$。

如果 n 个插值结点取勒让德(Legendre)多项式 $\frac{1}{2^n n!}\frac{\mathrm{d}^n}{\mathrm{d}t^n}[(t^2-1)^n]$ 在区间[-1，1]上的 n 个零点，则

插值求积公式称为高斯求积公式，其代数精确度为 $2n-1$

多指标权数的求解

王书华，毛汉英：土地综合承载力指标体系设计及评价——中国东部沿海地区案例研究 自然资源学报，2001，16(3)

(1) 求随机变量的均值 $E(G_j)$：

$$E(G_j)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}Z$$

(2) 求 G_j 的均方差 $F(G_j)$：

$$F(G_j)=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left[Z_{ij}-E(G_j)\right]^2}$$

(3) 求指标 G_j 的权系 $W(G_j)$：

$$W(G_j)=\frac{\sigma(G_j)}{\sum_{j=1}^{m}\sigma(G_j)}$$

生态不安全指数

吴国庆：区域农业可持续发展的生态安全及其评价研究 自然资源学报，2001，16(3)

设 $X_i(i=1,2,3,\cdots,n)$ 为第 i 个评价指标的指标值，$P(C_i)$（C_i 为指标号）为第 i 个指标的不安全指数，$0\leqslant P(C_i)\leqslant 1$，$XS_i$ 为评价指标的指标阈值，则：

(1) 对于越大越安全的指标：

①若以安全值为指标阈值：如 $X_i\geqslant XS_i$，则 $P(C_i)=0$；如 $X_i<XS_i$，则 $P(C_i)=1-X_i/XS_i\times100\%$；②若以不安全值为指标阈值：$X_i\leqslant XS_i$，则 $P(C_i)=1$；如 $X_i>XS_i$，则 $P(C_i)=XS_i/X_i\times100\%$。

(2) 对于越小越安全的指标：

①若以安全值为指标阈值：如 $X_i\leqslant XS_i$，则 $P(C_i)=0$；如 $X_i>XS_i$，则 $P(C_i)=1-XS_i/X_i\times100\%$；②若以不安全值为指标阈值：$X_i\geqslant XS_i$，则 $P(C_i)=1$；如 $X_i<XS_i$，则 $P(C_i)=X_i/XS_i\times100\%$。

(3) 嘉兴市生态不安全指数计算公式：

$$P(O)=\sum_{i=1}^{23}W(C_i)P(C_i)$$

土地利用的时空变化分析模型

朱会义等：环渤海地区土地利用的时空变化分析 地理学报，2001，56(3)

(1) 土地利用动态度：

土地利用类型的数量变化公式：

$$K=\frac{U_b-U_a}{U_a}\frac{1}{T}\times100\%$$

式中，U_a，U_b 分别为研究期初及研究期末某一种土地利用类型的数量；T 为研究时段长。当 T 设定为年时，K 为研究时段内某一土地利用类型的年变化率。

综合土地利用动态度的计算。区域综合土地利用动态度可描述区域土地利用变化的速度，公式表达为：

$$L_C=\frac{\sum_{i=1}^{n}\Delta L_{U_{i-j}}}{2\sum_{i=1}^{n}L_{U_i}}\frac{1}{T}\times100\% \qquad (2)$$

式中，L_{U_i} 为监测起始时间第 i 类土地利用类型面积；$\Delta L_{U_{i-j}}$ 为监测时段第 i 类土地利用类型转为非 i 类土地利用类型面积的绝对值；T 为监测时段长度，当 T 设定为年时，L_C 的值该研究区土地利用年变化率。

(2) 单一土地利用类型相对变化率：

$$R=\frac{|K_b-K_a|C_a}{K_a|C_b-C_a|}$$

式中，K_a，K_b 分别为区域某一特定土地利用类型研究期初及研究期末的面积；C_a，C_b 分别代表全研究区某一特定土地利用类型研究期初及研究期末的面积。

(3) 土地利用变化类型的多度和重要度：

多度的计算方法：

$$D=\frac{N_i}{N}\times100\%$$

式中，D 为某种土地利用变化类型的多度；N_i 为该种土地利用变化类型的个体数；N 为该区全部土地利用类型的个体数。

重要值为多度与面积比的综合表示，用公式可描述为：

$$IV=D+B$$

式中，IV 为某种土地变化类型的重要值；D 为该种土地利用变化类型的多度；B 为该种土地利用变化类型的面积比。

山地土地类型质量评价模式

刘彦随：山地土地类型的结构分析与优化利用——以陕西秦岭山地为例 地理学报，2001，56(4)

$$W_k=\sum_{i=1}^{p}\alpha_i^k\sum_{j=1}^{g}S_{ij}^kF_{ij}^k$$

式中，W 为环境要素评分(0~100)；k 为环境要素序号(1~5)；i 为环境要素各因子序号(设有 p 个因子)；j 为因子等级序号(设分 g 个等级)；α 为因子生态效应权重(0~1)；S 为因子不同等级面积比例；F 为因子等级评分。

将各环境要素的资源潜力分值按各自在环境中效应权重进行加权组合，求出各土地类型单元质量潜力分。以分值大小表示其质量的优劣。评价模式如下：

$$E_n=\sum_{k=1}^{5}\beta_kW_k^n$$

式中，E_n 为第 n 个土地类型单元的质量分值，n 为土地类型单元序号(1~40)；β_k 为 k 要素权重；W_n^k 为 k 要素在第 n 个土地类型单元的评价分值。

旱作产量潜势的计算公式

黄明斌，董翠云，李玉山：黄土高原水土流失区粮食现状与增产潜力研究．自然资源学报，2001，16(4)

(1) 计算模型：

$$Y_d=\sum_{i=1}^{n}Y_{si}f(I_{la})f(T)f(W)$$

式中，Y_d 为旱作产量潜势；Y_{si} 为光合生产潜力；$f(I_{la})$ 为叶面积指数修正系数；$f(T)$ 为温度修正系数；$f(W)$ 为水分因子修正系数；i 为第 i 个生长时段，n 为全生育期划分的总时段数。光合生产潜力的计算公式为：

$$Y_{si}=A\cdot C_n[F_i\cdot Y_{0i}+(1-F_i)Y_{ei}]$$

式中，A 为经济系数；C_n 同化物转化率；Y_{0i}，Y_{ei} 分别为全阴天和全晴天一定地点标准作物的总干物质；F_i 为每天云遮盖时间的比率。

(2) 水分订正函数：

$$f(W)=1-k_y\left(1-\frac{aR_1'+R_2'}{ET_m}\right)$$

式中，k_y 为作物产量反映系数；a 为修闲期蓄熵率；R_1'、R_2' 分别为修闲期和作物生长期的有效降水量；ET_m 为作物需水量。

土地利用优化配置模型

刘彦随，方创琳：区域土地利用类型的胁迫转换与优化配置——以三峡库区为例．自然资源学报，2001，16(4)

$$S(X)=5685X_1+8742X_2+225X_3+6645X_4-2468500X_5+98240X_6+3615420X_7-55400X_8+62000X_9+1935X_{10}+X_{11}$$

式中，X_1 代表耕地；X_2 代表园地；X_3 代表林地；X_4 代表牧草地；X_5 代表城镇用地；X_6 代表农村居民点用地；X_7 代表工矿用地；X_8 代表特殊用地；X_9 代表交通用地；X_{10} 代表水域；X_{11} 代表未利用地。

土地资源可持续利用的评价模型

彭补拙，安旭东，陈浮等：长江三角洲土地资源可持续利用研究．自然资源学报，2001，16(4)

(1) 评价指标的量化公式：

当 x 为正作用指标时：

$$a_j=(x_j/s_j)^c\times100\%$$

当 x 为负作用指标时：

$$a_j=(s_j/x_j)^c\times100\%$$

式中，C 为刻画模糊度的常数。

(2) 指标量化的综合评价模型：

$$U=\sum_{i=1}^{3}(\sum_{j=1}^{n}a_j\cdot r_j)\cdot\omega_i$$

式中，ω_i 是第 i 个子目标的权重；r_j 是第 j 个单项因素的权重；a_j 是第 j 个单项指标的量化指标值；U 为区域土地资源可持续利用综合水平指标。

(3) 可持续利用障碍诊断模型：

$$R_j=r_j\omega_i$$

式中，r_j 为第 j 项单项因素权重，ω_i 是第 j 项单项因素所属的第 i 个子目标权重；$P_j=1-a_j$，a_j 为单项因素评估值；$A_j=P_jR_j/\sum_{j=1}^{36}(P_j-R_j)\times100\%$。

面积-周长的分维关系

田光进，张增祥，王长有等：基于遥感与GIS的海口市土地利用结构动态变化研究．自然资源学报 2001，16(6)

$$P=A^{CSD}$$

式中，D 表示景观类型的分维数，P 是斑块的周长，A 是斑块的面积。转化为对数形式为 $\ln P = \ln C + 0.5D\ln A + e$。

土地利用结构的特征指标

倪晋仁等：基于土地利用结构变化的水土流失动态评估. 地理学报，2001，56(5)

$$I_S = \sum_{i=1}^{n} W_i A_i$$

式中，I_S 为土地利用结构的特征指标；W_i 为不同土地利用类型的重要性权重；A_i 为对应土地利用类型的面积百分比。

土地利用结构、特征时空变化分析模型

王思远等：中国土地利用时空特征分析. 地理学报，2001，56(6)

(1) 土地利用/土地覆盖演变时空建模：

1) 土地利用动态度模型：

土地利用变化速率的区域差异可以用土地利用动态度模型来表述，即：

$$S = \left[\sum_{ij}^{n}(dS_{i-j}/S_i)\right] \times 100 \times (\frac{1}{t}) \times 100\%$$

式中，S_i 为监测开始时间第 i 类土地利用类型总面积；dS_{i-j} 为由监测开始到监测结束时段内第 i 类土地利用类型转化为其他类土地利用类型面积总和；t 为时间段；S 为与 t 时段对应的研究样区土地利用变化速率，为方便，将其扩大 100 倍。

2) 土地利用程度时空演变模型：

一个地区的土地利用程度变化是多种土地利用类型变化的综合结果，土地利用程度及其变化可定量地表达该地区土地利用的综合水平和变化趋势。土地利用程度变化值可表达为：

$$\Delta I_{b-a} = I_b - I_a = \left[(\sum_{i=1}^{n} A_i C_{ib}) - (\sum_{i=1}^{n} A_i C_{ia})\right] \times 100$$

式中，I_a，I_b 分别为 a 时间和 b 时间的研究区域土地利用程度综合指数；A_i 为第 i 级土地利用程度分级指数；C_{ia}，C_{ib} 分别为时间 a 和时间 b 第 i 级土地利用程度面积%。如 ΔI_{b-a} 为正值，则该区域土地利用处于发展期；否则处于衰退期。但 ΔI_{b-a} 的大小并不反映生态环境的好坏。

(2) 耕地资源时空变化分析：

1) 垦殖指数：

$$I = \frac{\sum a_i}{A} \times 100 \qquad (\sum a_i \leqslant A)$$

式中，I 为研究单元的土地利用垦殖指数；a_i 为研究单元内耕地所占的土地面积；A 为研究单元的土地利用总面积。

2) 根据垦殖指数定义，可以定义垦殖指数变化模型为：

$$\Delta I_{b-a} = I_b - I_a = \frac{\sum a_{ib} - \sum a_{ia}}{A} \times 100$$

$$dI_{b-a} = \frac{\Delta I_{b-a}}{I_a}\frac{1}{t} \times 100\%$$

式中，I_a，I_b 分别为 a 时间和 b 时间的分析单元的垦殖指数；ΔI_{b-a} 为在时间段 a 与 b 之间的垦殖指数的变化量；dI_{b-a} 为 t 时间段对应的垦殖指数变化率 t 为时间段 $b-a$。

坡耕地退耕模型

王黎明等：三峡库区退耕坡地环境移民压力研究. 地理学报，2001，56(6)

(1) 坡耕地退耕人口压力指数模型：

令 P_i 表示第 i 个评价土地单元所承受的压力，则 P_i 由下式计算：

$$P_i = \frac{u_i}{v_i} \times 100\%$$

式中，u_i 为坡耕地分布指数，是单位土地面积内坡耕地面积所占百分比；v_i 为耕地分布指数，是单位土地面积内耕地面积所占百分比。

1) 坡耕地分布指数 u_i 由下式计算：

$$u_i = \frac{\sum_{k=1}^{n}(s_k q_k h_k)}{\sum_{k=1}^{n} s_k} \times 100\%$$

$$(k = 1, 2, \cdots, n)$$

式中，s_k 为第 i 耕地单元的邻域内第 k 块土地单元面积；q_k 分别表示该单元耕地生产力等级指数；h_k 为坡耕地识别参数，坡耕地 h_k 为 1，其他类型用地 h_k 为 0。

2) 耕地分布指数 μ_i 由下式计算：

$$\mu_i = \frac{\sum_{k=1}^{n}(s_k q_k h'_k)}{\sum_{k=1}^{n} s_k} \times 100\%$$

$$(k = 1,2,\cdots,n)$$

式中，h'_k 为耕地识别参数，耕地 h'_k 为 1，其他类型用地 h'_k 为 0；$s_k q_k$ 的含义是把耕地面积折算为可以相互置换的标准化面积，称其为基准面积。$q_k = \sum_{j=1}^{z}(w_j \mu_j)$，$z$ 为影响耕地生产力的因素的个数；w_j 为权重值；μ_j 为对第 j 因素的评价的模糊隶属度函数。μ_j 由基于地图代数运算的多因子模糊综合评判模型计算，公式如下：

$$\mu(x) = \begin{cases} \exp\left[-\left(\dfrac{x-a+b}{\lambda_1}\right)^2\right] & (x \leqslant a-b) \\ 1 & (a-b < x < a+b) \\ \exp\left[-\left(\dfrac{x-a-b}{\lambda_2}\right)^2\right] & (x \geqslant a+b) \end{cases}$$

式中，$\lambda_1 = \dfrac{c-a+b}{\sqrt{\ln 2}}$；$\lambda_2 = \dfrac{d-a-b}{\sqrt{\ln 2}}$；

a、b、c、d 是 4 个参数，这些参数决定了隶属度函数的形状。a、b、c、d 的意义为：当 x 在 $a-b$ 到 $a+b$ 的范围内，具有最大隶属度 1，当小于等于 $a-b$ 或大于等于 $a+b$ 时，按以上公式中的指数函数取值。当 x 等于 c、d 时，隶属度为 0.5。

(2) 环境移民数量模型：

环境移民数量是与退耕压力指数相对应的。令 e 为可以承受的最大退耕压力指数，那么退耕压力指数大于 e 的坡耕地单元所关联的人口数的总和，即是潜在环境移民数。即：

$$M = \sum s_i r_i \quad e < P_i < 100\%$$

式中，M 为环境移民人口数；s_i 为第 i 单元耕地的“耕地-人口关联系数”，其意义是与该单元耕地相关联的人口数；r_i 表示为该土地单元的海拔高度、耕地质量、区位条件等的函数。而耕地压力指数小于 e 的坡耕地单元所关联的人口数则是可以本地安置的人口数。

第十四章 交通地理

产销区划分析公式

杨吾扬：关于产销区划的一些原理、方法的介绍和体会．地理学报，1963，29(1)

(1) 两个方向的运输成本近似比例：

$$\frac{t_{重}}{t_{空}}=\frac{R_{重}-R_{空}K_s}{R_{重}-R_{空}K_s}$$

式中，$t_{重}$和$t_{空}$分别代表重车和空车方向的运输成本；$R_{重}$和$R_{空}$分别代表重车和空车的平均总重量；K_s代表空车列车运行每一总重吨公里的费用与重车列车运行同样费用的比例。

(2) 相邻两生产基地产销分界点分析公式：

$$C_1+t_1l_1=C_2+t_2l_2$$

式中，C_1和C_2分别代表两生产基地的生产成本(元·t^{-1})；t_1和t_2分别代表由两生产基地至分界点的运费率(元·t^{-1}·km^{-1})；l_1和l_2分别代表由两生产基地至分界点的距离(km)。

(3) 考虑产品效益时的相邻两生产基地产销分界点分析公式：

$$\frac{C_1+tl_1}{U_1}=\frac{C_2+tl_2}{U_2}$$

式中，U_1和U_2分别代表两生产基地的单位产品的效益量。

(4) 产销区划中的基本建设投资分析公式：

$$C_{n1}+t_{n1}l_1=C_{n2}+t_{n2}l_2$$

式中，C_{n1}和C_{n2}分别代表计算期中两生产基地不包括固定资产折旧的生产成本(元·t^{-1})；t_{n1}和t_{n2}分别代表计算期中两生产基地产品运输不包括交通线固定资产折旧的运费率(元·t^{-1}·km^{-1})；l_1和l_2分别代表由两生产基地至分界点的距离(km)。

交通吸引范围及其模式

杨吾扬，梁进社：关于吸引范围及其模式与划分方法．地理学报，1985，40(2)

(1) 运费比较算法：

$$\frac{T_1}{T_2}=\frac{l_{干1}t_{干1}+l_{支1}t_{支1}+t_{装1}}{l_{干2}t_{干2}+l_{支2}t_{支2}+t_{装2}}$$

式中，T_1和T_2各径路的总运费；$l_{支1}$和$l_{支2}$(km)分别为K至AB线和CD线的站(港)P和Q的支线距离；$t_{支1}$和$t_{支2}$(元·t^{-1}·km^{-1})为支线的运费率；$t_{装1}$、$t_{装2}$为经由AB线和CD线的装卸费用。

(2) 货运量：

$$Q_1=\sum_{i=1}^{l}\left[\sum_{j=1}^{l}\left(X_{ij}^{(1)}+X_{ji}^{(1)}\right)+\sum_{j=1}^{m}\left(X_{ij}^{(3)}+X_{ji}^{(2)}\right)+\sum_{j=1}^{n}\left(Y_{ij}^{(1)}+Z_{ji}^{(1)}\right)\right]$$

式中，$X_{ij}^{(1)}$为从某一级别的一段线路上的站港点A_i运往A_j的货运量($i,j=1,2,\cdots,l$)；$X_{ij}^{(2)}$为从其支线上的站港点B_i运往A_j的货运量($i=1,2,\cdots,m$; $j=1,2,\cdots,l$)；$X_{ij}^{(3)}$为A_i运往B_j的货运量($i=1,2,\cdots,l$; $j=1,2,\cdots,m$)；$Y_{ij}^{(1)}$为A_i运往与该线有运量联系的线外站港点C_j的货运量($i=1,2,\cdots,l$; $j=1,2,\cdots,n$)；$Z_{ij}^{(1)}$为从C_i运往A_j的货运量($i=1,2,\cdots,n$; $j=1,2,\cdots,l$)；Q_1为干线的站港装卸量。

$$Q_2=\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l}X_{ij}^{(1)}+\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{m}X_{ij}^{(3)}+\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{m}X_{ij}^{(2)}+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}X_{ij}^{(4)}$$

式中，$X_{ij}^{(4)}$为B_i运往B_j且经过干线的货运量($i,j=1,2,\cdots,m$)；Q_2为该干线的地方货运量。

$$Q_3=\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{n}Y_{ij}^{(1)}+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}Y_{ij}^{(2)}+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{l}Z_{ij}^{(1)}+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}Z_{ij}^{(2)}$$

式中，$Z_{ij}^{(2)}$为C_i运往B_j且经过干线的货运量的货运量($i=1,2,\cdots,n$; $j=1,2,\cdots,m$)；Q_3为干线的直通货运量。

$$Q_4=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}$$

式中，$W_{ij}^{(1)}$为C_i运往C_j且经过干线的货运量的货运

量$(i, j=1,2,\cdots,n)$；Q_4 为干线的通过货运量。

$$Q=\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l}X_{ij}^{(1)}+\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{m}(X_{ji}^{(2)}+X_{ij}^{(3)})+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}X_{ij}^{(4)}+$$
$$\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{n}(Z_{ji}^{(1)}+Y_{ij}^{(1)})+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(Y_{ij}^{(2)}+Z_{ji}^{(2)})+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}$$

式中，$Y_{ij}^{(2)}$ 为从 B_i 运往 C_j 的货运量且经过干线的货运量$(i=1,2,\cdots,m;\ j=1,2,\cdots,n)$；$Q$ 为干线的货运总量。

区域客流分布模型

冯杰：区域客流分布模型的研究．地理学报，1990，45(1)

（1）总出行量平衡条件：

$$T=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}T_{ij}=\sum_{i=1}^{n}O_i=\sum_{j=1}^{n}D_j$$

式中，T_{ij} 为从 i 区到 j 区的客流量；$O_i=\sum_{j=1}^{n}T_{ij}$ 为 i 区出行的旅客量；$D_j=\sum_{i=1}^{n}T_{ij}$ 为到达 j 区的旅客量。

（2）客流分布的模式：

$$T_{ij}=O_iA_iB_jD_jF(R_{ij})$$

式中，R_{ij} 为 i 区到 j 区的最短距离；O_i，D_j 和 T_{ij} 的含义同上；$F(R_{ij})=\exp(-\beta R_{ij})$（或 $F(R_{ij})=R_{ij}^{-\gamma}$，$\gamma=-\frac{dT_{ij}}{dR_{ij}}\frac{R_{ij}}{T_{ij}}$ 为客流量随距离增加而衰减的弹性系数）为 R_{ij} 的递减函数，$\beta=-\frac{dT_{ij}}{dR_{ij}}\frac{1}{T_{ij}}$ 为距离对客流量的摩擦系数；$A_i=\frac{1}{\sum_{j=1}^{n}B_jD_jF(R_{ij})}$ 和 $B_j=\frac{1}{\sum_{i=1}^{n}O_iA_iF(R_{ij})}$ 为保证各区域旅客发送量和到达量平衡的比例因子。

运输系统的区域效应模型

高小真：运输系统的区域效应研究．地理学报，1991，46(1)

（1）柯布-道格拉斯生产函数：

$$R=K_rC_r^{\alpha}L_r^{\beta}$$

$$Y_1=K_1C_1^{a}L_1^{b}$$

式中，R 和 Y_1 分别为初级产品和制成品的产量；C_1 和 C_r 为资本投入；L_1 和 L_r 为相应的劳动力投入；K_1 和 K_r 为与生产技术水平有关的正常数；α，β，a 和 b 均为正常数

（2）自给式经济的解：

$$L_1^*=eLb$$

$$L_r^*=L(1-be)$$

$$C_1^*=\alpha\beta eC/[\alpha\beta e+\alpha(1-be)]$$

$$C_r^*=\alpha(1-be)C/[\alpha\beta e+\alpha(1-be)]$$

$$R^*=\frac{K_r(\alpha C)^{\alpha}L^{\beta}(1-be)^{\alpha+\beta}}{[\alpha\beta e+\alpha(1-be)]^{\alpha}}$$

$$Y^*=\frac{K_1(\alpha\beta C)^{a}(bL)^{b}e^{a+b}}{[\alpha\beta e+\alpha(1-be)]^{\alpha}}$$

$$P^*=\frac{P_r\beta K_r(\alpha C)^{\alpha}L^{\beta-b}(1-be)^{\alpha+\beta-1}e^{1-(a+b)}}{K_1(\alpha\beta C)^{a}b^{b}[\alpha\beta e+\alpha(1-be)^{\alpha-a}]}$$

式中，P^* 为区域产品的产地价。

（3）市场经济的解：

$$L_r=L-L_1$$

$$C_1=\alpha\beta CL_1/(\alpha\beta L_1+abC_r)$$

$$C_r=abCL_r/(\alpha\beta L_1+abC_r)$$

吉尼系数计算公式

曹有挥：长江沿岸港口体系空间结构研究．地理学报，1999，54(3)

$$G=0.5\sum_{i=1}^{n}|x_i-y_i|$$

式中，n 为港口体系内的港口数；x_i 为 i 港口的货物吞吐量占港口体系货物吞吐总量的比重；y_i 为货物吞吐量绝对均匀分析时 i 港口吞吐量占港口体系吞吐总量的比重（$y_i=1/n$）。

交通网络分形特征的三种基本分维数计算公式

刘继生，陈彦光：交通网络空间结构的分形维数及其测算方法探讨．地理学报，1999，54(5)

（1）长度维数：

$$L(r)=L_1r^{D_L}$$

式中，r 为区域半径；$L(r)$为半径为 r 的地域范围内网络总长度；L_1 为常系数；D_L 为长度维数。

（2）分枝维数：

$$N(r)=N_1r^{D_b}$$

式中，r 为回转半径；$N(r)=\sum_{k=1}^{r}n(k)$，$n(k)$ 为第 k 个同心环带中交通网络分枝数目；N_1 为常系数；D_t 为分枝维数。

(3) 关联维数：

$$C(r)\propto r^{D_s}$$

式中，$C(r)=\frac{1}{N^2}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\theta(r-d_{ij})$，$d_{ij}$ 为 i，j 两城市之间的距离，θ 为 Heaviside 函数；N 为某区域城市的个数；D_s 为关联维数。

长江下游港口体系职能结构的分析模型

曹有惠等：长江下游港口体系的职能结构. 地理学报，2001，56(4)

(1) 港口的专业货种是反映港口职能特征的重要指标之一。这里对长江下游沿岸各主要港口 P_i ($i=1,2,\cdots,m$) 在货种 P_j ($j=1,2,\cdots,n$) 上的出口量 e_{ij} (10^4 t) 做"货种区位商"(cargo location quotient) 计算。计算公式如下：

$$LQ(i,j)=\frac{E_1}{E_2}$$

式中，$E_1=e_{ij}\Big/\sum_{j=1}^{n}e_{ij}$　($n=1,2,\cdots,11$)；

$E_2=\sum_{i=1}^{m}e_{ij}\Big/\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}e_{ij}$　($m=1,2,\cdots,12$)。

(2) 以港口分工系数来刻画港口体系职能结构的动态变化特征的数学表达式如下：

$$P_d=\sum_{i}^{N}\left[\sum_{j}^{P}(LQ_{ij}-1)^2\right]^{\frac{1}{2}}\Big/N$$

式中，P_d 为港口分工系数；LQ_{ij} 为 j 港口 i 货种的区位商；P 为某港口体系内的港口数目；N 为港口吞吐货物的货种数目。很显然 P_d 值越大，港口体系内各港之间的货种结构差异越大。

(3) 以港口综合实力指数作为划分港口体系职能结构的等级层次划分标准。

运用 R 型因子方法计算港口的综合实力指数。其基本原理和步骤是：假定对 n 个港口进行 m 项指标综合评估，其指标集矩阵为 x_{ij} (式中，$i=1,2,\cdots,n$；$j=1,2,\cdots,m$)。为消除量纲量级对评估的影响，可对原指标集矩阵进行标准化，从而形成新的指标集矩阵 y_{ij}；计算 y_{ij} 的相关系数据阵 R，并对相关系数矩阵进行向量内积求出特征值 λ_i，求解求逆紧凑变换求得相应的特征向量 l_{ij}；按照特征值的累计百分率确定 P 个主因子 Z_i，并求每一主因子的贡献率 P_j；计算第 i 个市、县的每一主因子的得分值 Z_{ij}；最后计算每个港口的综合实力指数 Q_i，其表达式为 $Q_i=\sum_{j=1}^{P}p_jZ_{ij}$ ($i=1,2,\cdots,n$)，Q 值越大，说明综合实力越强；反之亦然。

第十五章 城市地理

均质地域的均质度公式

于洪俊：试论城市地域结构的均质性 地理学报，1983，38(3)

$$D = \lambda\left\{1 + \frac{\omega_i}{\sum\limits_{i=1}^{n}\omega_i}\lg\frac{\omega_i}{\sum\limits_{i=1}^{n}\omega_i}\right\}$$

式中，D 为均质地域的均质度；λ 为系数；ω_i 为均质地域内第 i 项职能的用地面积；n 为职能种类。

两个城市的基于能量成长模型

Zucchetto J：能量与人类定居模式的前景——理论、模型与未来经济的思考．Ecological Modelling，1983，20

$$\frac{dQ_1}{dt} = J_8 + J_2 - J_6$$

$$\frac{dQ_1}{dt} = K_1E_{1r}Q_1^a + K_2FQ_1^a - K_3Q_1^b$$

$$\frac{dQ_2}{dt} = J_9 + J_3 - J_7$$

$$\frac{dQ_2}{dt} = K_4E_{2r}Q_2^a + K_5FQ_2^a - K_6Q_2^b$$

$$\frac{dF}{dt} = J_0 - K_7FQ_1^a - K_8FQ_2^a$$

且 $E_{ir} = E_i/(1 + K_0Q_i^a) \quad (i = 1,2)$

式中，Q_1 和 Q_2 分别代表大城市和小城市的结构；F 是指不可再生能源的储量；E_1 和 E_2 分别是城市 1 和城市 2 从可再生资源中获得的最大能量流；J_0 是能源的探明值；J_1 是指存储能量的耗费；J_4 和 J_5 分别是城市 1 和城市 2 消耗的可再生能量；$E_{1r} = E_1 - J_4$ 和 $E_{2r} = E_2 - J_5$ 是从可再生资源中残留下来的仍可利用的能量；J_2 和 J_9 代表源于可再生资源的净增长；J_8 和 J_3 代表源于不可再生资源的净增长；J_6 和 J_7 指折旧。所有的 K 是常数，a 和 b 是幂指数。

李(1980)修改了这个模型，他分别把这两个城市系统(核心区和外围)分解为资本和人口两个部分：

$$\frac{dQ_1}{dt} = K_1FQ_1^a - K_2Q_1^b \qquad (b > a > 1)$$

$$\frac{dQ_2}{dt} = g_1FQ_2^a - g_2Q_2^b \qquad (b > a > 1)$$

$$\frac{dF}{dt} = J_0 - KFQ_1^a - gFQ_2^a$$

式中，Q_1 是核心区的资本或结构；Q_2 是城市外围的资本或结构；F 是能源；$K_1, K_2, g_1, g_2, K, g, a$ 和 b 都是参数。

总人口 P 假定为一常数，它等于核心区的人口 P_1 与外围区的人口 P_2 之和，并假定人口受资本的吸引，则有：

$$P_1 = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2}P$$

$$P_1 = \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2}P$$

商业中心分类(聚类分析中斜交空间的距离公式)

宁越敏：上海市区商业中心区位的探讨 地理学报，1984，39(2)

$$d_{jk} = \left[\frac{1}{m^2}\sum_{i=1}^{m}\sum_{l=1}^{m}(x_{ji} - x_{ki})(x_{jl} - x_{kl})r_{il}\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$(j,k = 1,2,\cdots,n)$$

式中，x_{ij} 为变量；r_{il} 为变量 i 与变量 l 间的相关系数；j 和 k 为商业中心。

各省区因子分数公式

许学强，叶嘉安：我国城市化的省际差异，地理学报，1986，41(1)

$$F_{jK} = \sum_{i=1}^{m}Z_{ji}L_{iK}$$

式中，F_{jK} 为 i 省的 K 因子分数；L_{iK} 为原始变量 i 的 K 因子载荷量；Z_{ji} 为 j 省标准化后的原始变量 i。

城镇等级体系不平衡指数(S)通用公式

周一星，杨齐：我国城镇等级体系变动的回顾及其省区地域类型 地理学报，1986，41(1)

$$S=\frac{\sum_{i}^{n}Y_i-50(n+1)}{100n-50(n+1)}$$

式中，n 为规模级的个数；Y_i 是各规模级按占城镇人口的比重从大到小排序后第 i 级的累计百分比。

城市地域结构的潜能模式

杨吾扬，杨齐：论城市的地域结构．地理研究，1986，5(1)

$$V_i(R)=\int_0^R P(x)e^{-bx}\mathrm{d}x$$

式中，$V_i(R)$ 为市区从中心到边缘一个方向的潜能；$P(X)$ 为距离中心为 x 远处的人口密度；R 为城市半径；b 为距离的摩擦系数。

集镇的服务范围计算公式

佘其铭，陆玉麒：县域集镇体系研究．地理研究，1986，5(2)

$$\overline{A}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}a_i\frac{x_i}{y_i}s$$
$$=a_1\frac{x_1}{y_1}+a_2\frac{x_2}{y_{21}}+\cdots+a_n\frac{x_{n1}}{y_n}$$

式中，$\overline{A}$ 为集镇服务范围；x_i 为集镇某种商品的销售额；y_i 为全县各集镇同种商品的销售额；n 为所选择的商品个数；s 为全县面积；a_i 为不同商品的权重，$\sum_{i=1}^{n}a_i=1(i=1,2,\cdots,n)$。

城镇体系的有关模型

杨吾扬：论城市体系．地理研究，1987，6(3)

(1) 距离衰减法则：

$$P_x=\int_0^x d_0e^{-bx}\cdot 2\pi x\mathrm{d}x$$

式中，d_0 为中心人口密度；$\mathrm{d}x$ 为边际人口密度；b 为密度梯度；x 为中心距离。

(2) 柏克曼的城市等级序列模型：

$$C=K(R+C)\frac{K}{1-K}\cdot R\quad(0<K<1)$$

式中，C 为最低层次市镇人口数；R 为其服务的乡村居民数；K 为比例因子；$\frac{K}{1-K}$ 为城市乘数。

$$P_m=\frac{KS^{m-1}}{(1-K)^m}\cdot R$$

式中，P_m 为层次城市的人口数；S 为每个城市的卫星城镇数。

(3) 齐夫的级别——规模模型：

$$P_r=\frac{P_1}{r^q}$$

式中，P_r 为第 r 级城市的人口；P_1 为第一级或首位城市的人口；r 为城市的级别；q 为指数。

城市间信息作用的系统分析模型

虞蔚：我国重要城市间信息作用的系统分析．地理学报，1988，43(2)

(1) 相关系数 R_{ij} 和相关系数矩阵：

$$R_{ij}=\frac{1}{n-1}\sum_{k=1}^{n}x'_{ik}x'_{jk}$$

式中，$x'_{ij}=\frac{x_{ij}-X_i}{S_i}$；$\overline{X}_i=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}x_{ik}$；

$$S_i=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{k=1}^{n}(x_{ik}-\overline{X}_i)^2}$$

x_{ij} 为各城市间长途电话话务量；在 R 型因子分析中，i 表示各发话城市，j 表示各收话城市；在 Q 型因子分析中，i 表示各收话城市，j 表示各发话城市。

(2) 提取前 P 个特征根(因子)：

$$\frac{\sum_{k=1}^{P}\lambda_k}{\sum_{k=1}^{30}\lambda_k}\geqslant 85\%$$

式中，λ_k 为特征方程 $|R-\lambda I|=0$ 的特征值。在 R 型分析中，因子代表已成形的信息集聚场；在 Q 型分析中，因子代表已成形的信息扩散场。

(3) 因子得分矩阵：

$$F=B'A(\wedge)^{-2}A'X$$

式中，$A=S\sqrt{\wedge}$ 为初始矩阵；B' 为对 A 施行方差极大旋转后的因子载荷矩阵；S 为将 P 个因子所对应的特征向量排列成的变换矩阵。一般以因子得分绝对值 1 为界，超过此值的城市，在 R 型分析中代表了集聚场中的集聚核心，在 Q 型分析中代表了扩散场中的扩散核心。

地-气交界层内能量平衡方程

边海，铁学熙：天津市夜间城市热岛的数值模拟．地理学报，1988，43(2)

$$H_R = H_T + H_Q + H_S - H_A - H_M$$

式中，H_R 为净长波辐射；H_T 为显热通量；H_Q 为潜热通量；H_S 为土壤热通量；H_A 为热平流通量；H_M 为人为热排放。

多元统计分析法

张景哲，刘启明：北京城市气温与下垫面结构关系的时相变化。地理学报，1988，43(2)

设某个要素 y 受 k 个要素 $x_1, x_2, \cdots, x_k$ 的影响，某内在联系是线性关系。通过 N 组观测得到一组数据为 $(y_\alpha, x_{\alpha1}, x_{\alpha2}, \cdots, x_{2k})$，$\alpha = 1,2,\cdots,N$。设多元回归的数学模型为：

$$y_\alpha = \beta_0 + \beta_1 x_{\alpha1} + \beta_2 x_{\alpha2} + \cdots + \beta_k x_{\alpha k} + \varepsilon_\alpha$$

运用最小二乘法可得回归方程：

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{k} b_i x_i$$

各个市镇对其他所有市镇的交互引力公式

许学强，胡华颖：对外开放加速珠江三角洲市镇发展。地理学报，1988，43(3)

$$v_i = \sum_{j=1}^{n} \frac{p_i p_j}{d_{ij}^b}$$

式中，v_i 为各个市镇对其他所有市镇的交互引力；d_{ij} 为各主要市镇间的直线距离；p_i，p_j 为各市镇的人口；b 为常数。

城乡再生产模式

柳杏扬，季彪，周宇等：县级市城规划的若干理论问题——以诸城市为例。地理学报，1989，44(3)

(1) 城乡劳动者对消费器的需求公式：

$$D_U^J(L_U) = Q_U^J$$

$$D_R^J(L_R) = Q_R^J$$

式中，$D_U^J(L_U)$ 为城市劳动力对 J 消费品的需求函数；$D_R^J(L_R)$ 为乡村劳动力对 J 消费品的需求函数；Q_R^J 和 Q_U^J 分别为乡村和城市消费品 J 的供给量；J =1,2,3 分别表示食品、住房和工业消费品；L 为生产过程中劳动力报酬。

(2) 生产函数：

$$X_U = f_U(L_U, K_U)$$

$$X_R = f_R(L_R, K_R)$$

式中，X_U 和 X_R 分别为城镇产业(包括工、交、商、建)和农业生产的总产出；K_U 和 K_R 分别为城镇产业和农业的不变资本；f_U 和 f_R 为可根据历史资料得出的生产函数。

(3) 新增投资：

$$I_t = X_t - K_t - L_t - F_t$$

式中，I_t 为新增加的投资；X_t 为本期城乡产业总产出；K_t 为生产中的物质消耗；L_t 为偿付劳动力的报酬；F_t 为政府财政收入和企业利润留成中用于非生产性建设部分的投资(包括上缴国库的资金)。

城市土地综合经济评价方法

董黎明，冯长春：城市土地综合经济评价的理论方法初探。地理学报，1989，44(3)

(1) 分值权重累加法：

$$P = \sum_{i=1}^{m} P_i W_i$$

式中，P 为市地评价单元的总评分值；W_i 第 i 因素的权重值；m 为市地评价中选取的因素个数；$P_i = \sum_{j=1}^{n} F_{ij} W_j$ 为第 i 因素的评分值，n 为每个因素包括的因子个数，F_{ij} 为第 i 因素中第 j 因子的分值，W_j 为第 j 因子的权重值。

(2) 模糊综合评价法：

$$B = AR = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = (B_1, B_2, \cdots, B_n)$$

式中，$A = (A_1, A_2, \cdots, A_m)$ 为综合因素权重集；$B = (B_1, B_2, \cdots, B_n)$ 为评价等级集；$R = (r_{ij})_{m \times n}$ 为模糊评判矩阵；n 为评价等级个数；m 为评价因素个数。

城市综合实力指数

顾朝林：中国城市经济区划分的初步研究。地理学报，1991，46(1)

$$Q_i = \sum_{k=1}^{p} \sum_{j=1}^{m} \rho_{kj} Y_{ij}$$

式中，Q_i 为城市综合实力指数；$Y_{ij} = (X_{ij} - \bar{X}_j)/\sigma_j$，$X_{ij}$ 为指标集矩阵中的元素($i = 1,2,\cdots,n; j = 1,2,\cdots,m$)，

$\overline{X}_i=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}X_{ij}$，$\sigma_j=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_{ij}-\overline{X}_j)^2}$；$\rho(Z_k,Y_j)=\sqrt{\lambda_k}\cdot I_{kj}$，$\lambda_i$为特征值，$I_{ij}$为特征向量元素。

城市热岛强度回归方程

周淑贞，郑景春：上海城市太阳辐射与热岛强度. 地理学报，1991，46(2)

$$\Delta T_{u-r\cdot 20}=1.201+0.048S-0.146\overline{V}-0.080V_{20}-0.022N_{20}$$

式中，$\Delta T_{u-r\cdot 20}$为热岛强度(逐日20时的气温差值)；S为太阳直接辐射日总量($\mathrm{hJ\cdot cm^{-2}\cdot d^{-1}}$)；$\overline{V}$为日平均风速($\mathrm{m\cdot s^{-1}}$)；$V_{20}$为20时风速($\mathrm{m\cdot s^{-1}}$)；$N_{20}$为20时低云量

城市水供需动态系统模拟模型

陈远生，袁铭昫：城市水资源管理决策中的动态模拟与控制方法. 自然资源，1993，2

$$\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t}=aI_1$$

$$\frac{\mathrm{d}Y}{\mathrm{d}t}=\begin{cases}ky & (W>Q_1)\\ \dfrac{W-Q_1'}{q} & (W<Q_1)\end{cases}$$

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}=gp$$

$$\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}=-e^{-st}\left(sq-b\frac{I_2}{y}\right)$$

$$I_1+I_2=1$$

$$a=\frac{a_0}{W}$$

$$Q_1=Q_1'+qy$$

$$Q_1'=pp_\omega\left(\frac{y}{p}\right)$$

$$I=cy(W-Q_0)+\Delta Q$$

$$b=r_0\sqrt{q}$$

$$\frac{a}{b}=\frac{I_2}{I_1}$$

式中，W为可供水量；a为供水条件因子；I_1为开源投资年额；y为工业产值；k为增长值数；Q_1为现期需水量；Q_1'为现期生活用水量；q为万元产值取水量；p为人口数；g为人口增长指数；e为自然对数底；s为社会经济进步指数；b为节水条件因子；I_2为节水投资年额；I为开源节流投资年总额；a_0为开源条件比例常数；$p_\omega\left(\frac{y}{p}\right)$为生活用水定额变量；$c$为水投资比例常数；$Q_0$为短期需水预测量；$\Delta$为供水收益率；$Q$为城市实际用水量；$r_0$为节水条件比例常数

城市生态位评价分值 p

李新生：铁岭市城市生态环境质量评价. 生态学杂志，1993，12(3)

$$p=\frac{\sum_{i=1}^{3}P_i}{3}$$

$$P_i=\sum_{j=1}^{n}W_jP_j$$

$$P_j=\frac{20}{\Delta I_j}(x_j-I_{aj})+P_{aj}$$

式中，P_j为j指标评分值；I_{aj}为j指标a级标准值；ΔI_j为j指标标准级差；x_j为j指标参数值；P_{aj}为j指标a级标准评分值；P_i为i生态位组综合评分值；W_j为j指标权值；n为I生态位组评价指标个数

土地类型结构分析模型

刘卫东：江汉平原土地类型与综合自然区划. 地理学报，1994，49(1)

(1) 对比结构分析模型：

$$Y_{kt}=\frac{\sum_{g=1}^{m}\left(x_{kg}-\overline{x}_k\right)\left(x_{tg}-\overline{x}_t\right)}{\left[\sum_{g=1}^{m}\left(x_{kg}-\overline{x}_k\right)^2\sum_{g=1}^{m}\left(x_{tg}-\overline{x}_t\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}}$$

式中，x_{kg}和x_{tg}分别为第k个和第t个土地类型图斑各自所属的土地类型的第g个要素特征值；$\overline{x}_k=\frac{1}{m}\sum_{g=1}^{m}x_{kg}$；$\overline{x}_t=\frac{1}{m}\sum_{g=1}^{m}x_{tg}$；$g=1,2,\cdots,m$为土地类型构成要素指标序号；$k,t=1,2,\cdots,n$为图斑序号

(2) 空间组合结构分析模型：

$$L_{kt}=\begin{cases}1 & \text{(镶嵌关系)}\\ \max\left\{\dfrac{L_k-L_t-L_N}{L_k},\dfrac{L_k-L_t-L_N}{L_t}\right\} & \text{(邻接关系)}\\ 0 & \text{(不接触关系)}\end{cases}$$

$$L_{kt}=\begin{cases}1 & \text{(镶嵌关系)}\\ \max\left\{\dfrac{L_k+L_t-L_N}{L_k},\dfrac{L_k+L_t-L_N}{L_t}\right\} & \text{(邻接关系)}\\ 0 & \text{(不接触关系)}\end{cases}$$

式中，L_k，L_t及L_N分别为第k个、第t个及第k个和第t个图斑共同组成的新图斑的周长。

(3) 时间演替结构分析模型：

$$P_{kt}=\max\left\{f\vec{V}_{kt},f\overleftarrow{V}_{kt}\right\}$$

式中，P_{kt}为第k个和第t个图斑所属的土地类型相互演替转换的概率；f为演替关系系数；V_{kt}为演替速度；→表示正演替；←表示逆演替。

范力农定理

杨吾扬：北京市零售商业与服务业中心和网点的过去、现在和未来 地理学报，1994，49(1)

$$S=\sum_{i=1}^{n}r_id_i=\sum_{i=1}^{n}r_i\left[(x-x_i)^2+(y-y_i)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

为使S达到最小，必须满足以下约束方程组：

$$\begin{cases}\dfrac{\partial S}{\partial X}=\sum\limits_{i=1}^{n}\dfrac{r_i}{d_i}(x-x_i)=0\\ \dfrac{\partial S}{\partial y}=\sum\limits_{i=1}^{n}\dfrac{r_i}{d_i}(y-y_i)=0\end{cases}$$

式中，n为市区中小区(x_i,y_i)的个数，$i=1,2,\cdots,n$；r_i为相应的居民数；d_i为每个小区中心至理想中心点(x,y)的距离。

城市基准地价扩散方程

鲁卫东、包浩生：非均质空间随机扩散方程及其在城市基准地价评估中的运用 地理学报，1995，50(3)

$$D(x,m)=D_{\max}F'(x,m)=\begin{cases}D_{\max}\operatorname{erf}\dfrac{x-\rho(m)}{\sqrt{4z(m)}} & (x>\rho(m))\\ D_{\max}\operatorname{erf}\dfrac{\rho(m)-x}{\sqrt{4z(m)}} & (x<\rho(m))\end{cases}$$

式中，$D_{\max}$以概率$F'(x,m)$扩散；$z(m)$和$\rho(m)$为综合土地质量m的函数。

城市投资环境的评价模型

苏亚芳：城市投资环境的评价模型及应用 地理研究，1994，13(3)

(1) 专家得分综合评价模型：

1) 专家得分单目标评价模型：

$$Q(i)=Q(f_1,f_2,\cdots,f_n)=\sum_{i=1}^{n}a_jS_j(i)$$

式中，$Q(i)$为某一特定研究目标投资单元i所表现出的基本属性；a_j为第j个因子所占的权重；$S_j(i)$为投资单元i的第j个因子的得分值。

2) 专家得分多目标评价模型：

$$Q_t(i)=Q(f_1,f_2,\cdots,f_m)=\sum_{i=1}^{m}a_{tj}S_{tj}(i)$$

式中，$Q_t(i)$为某一特定研究目标投资单元i对于方式t这一目标所表现出的基本属性；a_{tj}为对于方式t这一目标第j个因子所占的权重；$S_{tj}(i)$为对于方式t投资单元i的第j个因子的得分值；t满足$Q_{t\max}(i)=\max\limits_{t=1}^{n}\{Q_t(i)\}$。

(2) 模糊评价模型：

1) 多目标模糊评价模型：

确定投资单元应归属目标j_0满足：

$$b_{j_0}=\max_{j=1}^{n}b_j$$

式中，$b_j=(a_1\odot r_{1j})\ominus(a_2\odot r_{2j})\ominus\cdots\oplus(a_m\odot r_{mj})$，$\odot$广义模糊"与"运算，$\ominus$为"或"运算；$a_i$为单因素$f_i$在总评定中所起作用大小的度量；$b_j$为目标$v_j$对综合评定所得模糊子集$\underset{\sim}{B}$的隶属度。

2) 单目标模糊评价模型：

$$b_{\mathrm{opt}}=\sum_{j=1}^{m}a_ir_i$$

或

$$b_{\mathrm{opt}}=(a_1\odot r_1)\oplus(a_2\odot r_2)\ominus\cdots\oplus(a_m\odot r_m)$$

式中，V={b_{cpt}}为评价结果集；矩阵单元值越大，所对应的投资单元就越应属于V_{opt}目标，反之，则越远离目标V_{opt}。

3) 连续型分布的因子隶属函数：

$$\mu(x)=\begin{cases}\exp\left[-\left(\dfrac{x-a+b}{K_1}\right)^2\right] & (x\leqslant a-b)\\ 1.0 & (a-b<x<a+b)\\ \exp\left[-\left(\dfrac{x-a-b}{K_2}\right)^2\right] & (x\geqslant a+b)\end{cases}$$

式中，$K_1=\dfrac{c-a+b}{\sqrt{\ln 2}}$；$K_2=\dfrac{d-a-b}{\sqrt{\ln 2}}$；$a,b,c,d$为参数。

城市居住人口密度估算模型

徐建刚，梅安新，韩雪培：城市居住人口密度估算模型的研究. 环境遥感，1994，9(3)

(1) 人口总数估值模型：

$$P_{\text{估}} = S_1D_1 + S_2D_2 + \cdots + S_nD_n$$

式中，S_i为i住宅类型的面积；D_i为该面积的人口密度

(2) 估计误差模型：

$$\Delta P = \left|\frac{P_{\text{统}} - P_{\text{估}}}{P_{\text{统}}}\right|$$

投资环境的熵值计算公式

杨先？：中国城市投资环境分析. 地理学报，1995，50(3)

$$S' = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} N_i\right)!}{\prod_{i=1}^{n} N_i!}$$

$$S = (1+r)^{w \cdot k} S'$$

式中，S和S'分别为修正前和修正后的投资环境熵；N_i为各类企业的从业人员数；r、w、k分别为外资实际利用率、反映开发和开放程度的宏观区位系数、反映劳动力文化素质的科技人员比率。

城市犯罪区位选择的数学模拟

叶浩斌，汤建中：城市犯罪区位选择的数学模拟. 地理研究，1995，14(3)

(1) 犯罪活动的区位优化模式：

$$E = \prod_{i=1}^{k-1} P_i \left[U_k^1 P^1 - U_k^2 P^2 + (P^1 - P^2)\sum_{n=k+1}^{s} U_n \prod_{i=k+1}^{n} P_i\right]$$

式中，E为在1区和2区实施第k次犯罪的期望效用之差；P_i为每次犯罪成功的概率；s为犯罪次数；U为单个罪犯犯罪的效用函数；h为在实施第h次犯罪时被抓获。

(2) 不同地区的犯罪活动水平模型：

假定罪犯在每个地区每次作案的收益和成功概率是不变的，并设罪犯在1区作案h次，在2区作案$(s-h)$次，则：

$$h > \frac{\ln\dfrac{\alpha-\beta}{1-\beta}}{\ln P^1} \equiv T$$

式中，$\alpha = U^2P^2/U^1P^1$；$\beta = (1-P^2)/(1-P^1)$；罪犯将在1区实施后s'次犯罪；在2区实施前$s-h'$犯罪(h'为s的上界)。上式表明，当$1-[(1-\alpha)/(1-\beta)]<0$时，即使$P^1 < P^2$，罪犯有可能集中选择1区作案；当$1-[(1-\alpha)/(1-\beta)]>0$，则罪犯在两个地区都有作案的可能。

(3) 多区域区位选择：

$$\Delta E = \prod_{i=1}^{k-1} P_i = (U_k^c P^c - U_k^m P^m)$$

式中，ΔE为在c地区和m地区实施第k次犯罪的期望效用之差

$$W \equiv \frac{U^n P_k - U_{k-1}^1 P^1}{P^1 - P^n}$$

当ΔE为负时，罪犯将从n区往回窜，然后再转移到W值最低的地区作案。

乡村市场销售总量模型与市场区划分方法

张继宏，郭焕成：集镇体系与乡村市场网络研究——以山东省滕州市为例. 地理研究，1996，15(4)

(1) 集镇平均每日社会商品零售总额计算公式：

$$V = \sum_{i=1}^{d}\left(V_1 + V_2\frac{r}{u}\right)/d$$

式中，V为集镇平均每日社会商品零售总额；V_1为集镇商业网点日均营业额；V_2为集镇逢集日集市贸易额；r为集镇周期性集市的集额；u为集镇周期性集市的集期；d为集镇周期性集市集期间隔

(2) 市场区划分实力均衡法：

$$K_{pj} = \left[\prod_{i=1}^{3}(q_{pij}x_{pij}) \Big/ \prod_{i=1}^{3}(q_{pi}x_{pi})\right]^{\frac{1}{3}}$$

式中，x_{pi}(i=1，2，3)分别为第p级节点集镇的平均集日参加交易的总人口、社会总产值与社会商品零售总额；x_{pij}(i=1，2，3；j=1，2，…，n)分别为p级j集镇平均集日参加交易人口、社会总产值与社会商品零售总额；q_{pij}、q_{pi}为权重系数；k_{pj}为p级j集镇的综合实力指数。

城市空间结构的自组织模型

帅江平：供求平衡状态下的城市自组织过程 地理学报,1996,51(4)

$$\frac{dP_i}{dt}=bP_i(N_i+\sum_k S_i^k-P_i)-mP_i-\sum_j\left[e^{-vd_{ij}}\left(P_i^2-P_j^2\right)\right]$$

$$\frac{dS_i^k}{dt}=S_i^k(E_i^k-S_i^k)$$

$$E_i^k=\sum_j\frac{\gamma(k)P_j}{1+\varphi(k)d_{ij}^2}KT_i^k$$

$$KT_i^k=\left[1+\frac{\rho(k)(P_i-P_{th}^k)}{1+\rho(k)(P_i-P_{th}^k)}\right]^q$$

式中，P_i，P_j 分别表示 i 点，j 点的人口数；i、j 表示区域号；t 表示时间；b 表示人口自然增长速度；m 表示人口迁移速度；N_i 表示系统基本承载人口；v 表示距离作用的摩擦系数；d_{ij} 为 i 点与 j 点的距离；S_i^k 为 i 与第 k 种需求形成的就业量；$\frac{dP_i}{dt}$ 表示 i 区人口变动速度；E_i^k 表示 i 点第 k 种功能所能支持的最大就业量；$\frac{dS_i^k}{dt}$ 表示 S_i^k 的变动速度；$\rho(k)$ 表示单位人口产生的第 k 种功能的供应量；$P_{th}^{(k)}$ 表示出现第 k 种功能的最低临界人口值；q 表示市场占有率敏感系数；$\gamma(k)$ 表示单位人口对第 k 种功能的需求；$\varphi(k)$ 表示第 k 种功能的平均单位距离运输成本；KT_i^k 表示 i 地第 k 种功能在 j 地的市场占有率。

修正的主成分分析法

陈沈斌，潘莉卿：城市化对北京平均气温的影响 地理学报,1997,52(1)

为了消除大气中 30 天到 60 天的“气候噪声”，首先对各台站平均气温进行 3 个月的滑动平均，突出北京的季节变化特征，使各站 1960 年至 1993 年月平均气温从上年 5 月到第 2 年 4 月组成新的时间序列矩阵 $(T_{ij})_{32\times12}$，$i=1,2,\cdots,32$ 对应于年份，$j=1,2,\cdots,12$ 对应于 5 月，6 月，…，3 月，4 月。则，主成分分析表达式为：

$$P_j=\sum_{i=1}^{32}E_jD_{ij}$$

式中，P_j 是第 j 主成分；E_j 是第 j 特征向量；

$$D_{ij}=\frac{T_{ij}-\overline{T}_j}{S_j}\;;\;\overline{T}_j=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{32}T_{ij}\;;\;S_j^2=\frac{1}{n-1}(T_{ij}-\overline{T}_j)^2$$

建筑期间河流沉积量 Q_s

徐刚：城市水土流失及其防治探讨 水土保持通报,1997,17(5)

$$Q_s=R\left[Q_c\frac{A_c}{A}+q\left(1-\frac{A_c}{A}\right)\right]A$$

式中，Q_c 为建筑工地的侵蚀速度；A_c 为建筑工地面积；q 为非建筑工地的侵蚀速度；A 为建筑工地所属流域的面积；R 为沉积物的迁移率。

模糊加权综合指数ΣQ

陈桂华，徐樵利：城市建设用地质量评价研究 自然资源，1997，5

$$\sum Q=\sum_{i=1}^{n}r_iP_i$$

式中，P_i 为主要因子的特定等级模糊量化值；r_i 为 i 因子的模糊权值；i 和 n 为主要因子的编号注记和总数目。

城市可持续发展动力学模型

张新生，何建邦：城市可持续发展与空间决策支持 地理学报，1997，52(6)

(1) 城市可持续发展的时空复合调控动力学模型：若城市地域空间有 m 个单元，各单元各层要素的空间分布为 $k_1(x,y)$，…，$k_n(x,y)$，某一层要素 j 对应着某一单元 i 就可以定义为该要素的“水库”，则这 $m\times n$ 个“水库”描述了某一特定时刻地域系统的状态。描述城市系统空间结构演变的状态方程为：

$$\frac{dr_i}{dt}=f(x,y,t;r_1,\cdots,r_{m\times n};\varphi_1,\cdots,\varphi_{m\times n})$$

式中，$i=1,2,\cdots,m\times n$；(x,y)为某一“水库”的空间位置；t 为时间；r_i 描述了系统的状态；φ_i 描述了各“水库”之间的相互反馈结构。

系统演变的状态方程为：

$$\frac{dr}{dt}=f(x,y,t;r;\varphi;u)$$

输出方程为：

$$P(x,y,t)=f(x,y,t;r;\varphi;u)$$

式中，$r(t)$ 为状态向量；φ 为系统反馈结构；u 为控制输入；$P(x,y,t)$为系统输出。

(2) 居住空间增长动力学方程：

根据logit模型，t时刻一个体i从单元$z'=(x',y')$迁移到$z=(x,y)$单元的概率或平均转移率为：

$$W^i(z'z,t)=V^P(t)\exp[U^i(z,t)-U^i(z',t)]$$

式中，$U^i(z,t)$和$U^i(z',t)$分别为i个体选择z和z'单元的功效函数。

设I_m为单位时间内外来迁入就业人口与该时间段总就业人口之比、I_c为总人口与总就业人口之比，$e(z',t)$为一定时间段内新增就业人口空间分布，则居住空间增长动力学方程为：

$$\frac{dP(z,t)}{dt}=\sum_i\sum_{z'}I_mI_ce^i(z,t)V^P(t)\exp[u^i(z,t)-u^i(z',t)]+P(z,t)[\beta(z,t)-\delta(z,t)]$$

式中，$P(z,t)$为t时刻居住人口的空间分布；$\beta(z,t)$和$\delta(z,t)$分别为t时刻出生与死亡过程。

(3) 房地产开发的空间增长动力学方程为：

$$\frac{dh(z,t)}{dt}=[L(z,t)-h(z,t)]V_z^h(t)\exp[U_z(z,t)]$$

式中，$V_z^h(t)$为系数；$L(z,t)$为z单元可供居住房地产开发的土地所能建设的房产面积。

(4) 服务消费流-服务设施规模空间增长模型：通过修正Lowry模型，可得居住在单元$z'=(x',y')$的人口到$z=(x,y)$单元寻求服务或购物的消费流为：

$$T(z'z,t)=AeP(z',t)M(z,t)\exp(-\beta C_{z'z})$$

式中，$A=\left[\sum_z M(z,t)\exp(-\beta C_{z'z})\right]^{-1}$为平衡系数；$e$为单位时间人均寻求服务或购物的金额；$C_{z'z}$为$z'$到$z$单元之间的交通代价；$\beta$为系数；$M(z,t)$为$z$单元对服务消费流吸引力；$T(z'z,t)$为新增消费流；$P(z',t)$为新增人口分布。

t时刻单元z的新增服务设施规模空间分布为：

$$B(z,t)=m\sum_{z'}T(z'z,t)$$

式中，m为系数；$B(z,t)$为服务设施规模空间分布，用营业面积计算。

城市人地系统综合评价模型

蔡运龙：城市人地系统指标体系的建立和应用——以黄土高原城市为例．地理研究，1997，16(增)

(1) 对城市人地系统进行评价的方法：

1) 将论域划分为n个因子集：x_1、x_2，…，x_n，划分结果满足：$X=x_1\cup x_2\cup\cdots\cup x_n$且对于任意的$i\neq j,(i,j=1,2,\cdots,n)$均有$x_i\cap x_j=\phi$。以$x_i$表示第$i$个子集，它可以有$k_i$个评判指标，即$x_i=\{x_{i1},x_{i2},\cdots,x_{in}\}$ $(i=1,2,\cdots,n)$。

2) 对每个子因子集x_i中的k_i个评判指标，先作出单层次综合评判：

$$B_i=(b_{i1},b_{i2},\cdots,b_{in})=R_iA_i\qquad(i=1,2,\cdots,n)$$

3) 对第一步划分中的n个子集，再按单层次综合评判的方法作种合评判，得到多层综合评判的结果：

$$R=\begin{bmatrix}B_1\\B_2\\\vdots\\B_n\end{bmatrix}=(b_{ij})$$

4) 对第一步划分中得到的n个子集按它们在总指标集X中的地位作出权重分配A。最终的综合评判结果为：

$$R=RA=\begin{bmatrix}B_1A_1\\B_2A_2\\\vdots\\B_nA_n\end{bmatrix}=(b_1,b_2,\cdots,b_n)$$

(2) 案例城市人地系统综合评价升半梯形模糊分布函数：

$$\mu=\begin{cases}0&(x\leqslant b_i)\\(x-b_i)/(a_i-b_i)&(b_i<x<a_i)\\1&(a_i\geqslant x)\end{cases}$$

$$(i=1,2,\cdots,m)$$

式中，μ为隶属度函数；x为各案例城市人地系统指标值；a_i，b_i为依据案例城市人地系统及其区域背景所确定的极值常数，m为评价指标数。

城市水环境承载力指数

崔凤军：城市水环境承载力及其实证研究．自然资源学报，1998，13(1)

假设一个城市制定的经济发展规划中有m个策略，则在一定规划时期内有m个水环境承载力，不妨设此m个水环境承载力为指数$E_j(j=1,2,\cdots,m)$，再设每个水环境承载力由n个具体指标确定的分量组成，即：

$$E_j=(E_{1j},E_{2j},\cdots,E_{nj})$$

归一化：

$$\widetilde{E}_j = (\widetilde{E}_{1j}, \widetilde{E}_{2j}, \cdots, \widetilde{E}_{nj})$$

式中，$\widetilde{E}_{ij} = E_{ij} / \sum_{j=1}^{m} E_{ij}$ ($i = 1,2,\cdots,n$)，($j = 1,2,\cdots,m$)。

根据以上分析，第 j 个水环境承载力指数的大小可以用归一化后的矢量模式来表示，即：

$$\left|\widetilde{E}_j\right| = \left[\sum_{j=1}^{n} (\widetilde{E}_{ij})^2\right]^{1/2}$$

城区土地定级模型

梁留科：城区土地定级实践研究——以唐河县为例．地理研究，1998，17(1)

(1) 作用半径计算公式：

1) 点状因素：

$$d_i = \sqrt{S/(n_i \pi)}$$

式中，d_i 为某点状因素、因子影响半径；S 为定级区域面积；n_i 为 i 类型个体数。

2) 线状因素：

$$d = S/2L$$

式中，d 为道路主干道或次干道的影响距离；S 为定级区面积；L 为干道长度。

(2) 作用分值计算公式：

1) 直线衰减法：

$$f_i = M(1 - r_i) \quad r_i = d_i / d$$

式中，f_i 为某因素、因子在某相对距离上对土地的作用分；M 为某因素、因子个体中心作用分；r_i 为地块相对距离；d_i 为实际距离；d 为其影响半径。

2) 指数衰减法：

$$f_i = M^{(1-r)} \qquad r = d_i / d$$

3) 区域赋值法：

$$f_i = 100(x_i - x_{\min})/(x_{\max} - x_{\min})$$

式中，$x_{\min}$，$x_{\max}$ 分别为最小指标值、最大指标值。

(3) 土地定级单元总作用分值：

1) 单元内商服繁华度分值计算公式：

$$F_i = F_1 - F_2$$

式中，F_i 为单元繁华影响度分值；F_1，F_2 分别为一、二级商服繁华作用分值。

2) 单元道路通达度分值计算公式：

$$F_i = f_i k_i$$

式中，F_i 为单元道路通达度分值；f_i 为单元道路通达作用分；k_i 为单元道路通达系数。

3) 单元总作用分值计算公式：

$$P = \sum_{i=1}^{n} W_i f_i$$

式中，P 为单元总分值；n 为定级因素数；W_i 为各因素权重；f_i 为各因素分值。

城市廊道预测模型

综跃光：大都市空间扩展的廊道效应与景观结构优化——以北京市区为例．地理研究，1998，17(2)

$$D_{Li} = D_{LAi} + N_{Li} n$$

式中，D_{Li} 为预测年期廊道长度；D_{LAi} 为某期城市廊道长度；N_{Li} 为年均廊道扩展系数；n 为预测年期。

城市节水潜力估算模型

陈建耀，刘昌明：城市节水潜力估算与用水管理水平评定．地理学报，1998，53(2)

(1) 工业用水：

$$Q_n + Q_p + Q_r = 100\%$$

式中，Q_n 为重复利用率；Q_p 为排水率；Q_r 为耗水率。

$$U_t = U_0 e^{-t}$$

式中，U_t 为 t 阶段后的定额(万元产值耗水量)；U_0 为现时段的定额。

(2) 节水潜力：

$$P_1 = \frac{R_{1实} - R_{1拟}}{R_{1实}} \times 100\%$$

式中，$R_{1拟}$ 为一定阶段水平的城市生活用水拟定额；$R_{1实}$ 为实际生活用水。

对特大城市：

$$R_{1拟} = 0.0409 + 1.38T_a + 0.0178W + 2.06G + 0.0162K$$

对大城市：

$$R_{1拟} = 0.67 + 4.57J + 1.01T_a + 0.013W + 1.23G + 0.0234K$$

式中，J 为城市非农业人口； G 为城市园林绿地覆盖率； K 为人均居住面积； T_a 和 W 分别为多年平均的气温和降水

城市体系 KOCH 雪花模型

陈彦光：城市体系 KOCH 雪花模型实证研究 地理学报，1998，18(4)

假定有一个 Christaller 式的区域 R，在此区域中城市体系将三点相关式生成，按照等距法则扩展。在理论上，任意两城市之间的距离与城市自身的“质量”有关，即：

$$I_{ij}=\frac{kQ_iQ_j}{r_{ij}^{\ b}}$$

式中，I_{ij} 为 i、j 两城市之间的引力； Q_i，Q_j 为城市的“质量”； k 和 b 为参数。

当城市体系的 Goethe 六角星出现以后，就会以此为生成元按自相似的原则产生更多较小的六角星，这样层层生衍，演化为 Koch 雪花式空间体系，它与中心地 K_3 体系具有相似的结构。

乡村性指数计算模型

张小林：乡村概念辨析 地理学报，1998，53(4)

$$RI^{st}=1-UI^{st}$$

$$UI^{st}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}R_i^{st}$$

$$R_i^{st}=\begin{cases}E_i^{st}/E_i^{0t} & (E_i^{st}/E_i^{0t}\leqslant 1)\\ 1 & (E_i^{st}/E_i^{0t}>1)\end{cases}$$

式中，RI^{st} 为 t 年份 s 区域的乡村性指数； UI^{st} 为 t 年份 s 区域的城市性指数； R^{st} 为 t 年份 s 区域城市性的第 i 个特征比值； E_i^{0t} 为第 i 个反映 t 年份城镇特征的标准值 $(i=1,2,\cdots,n)$； E_i^{st} 表示反映 t 年份 s 区域城镇特征的第 i 个指标值 $(i=1,2,\cdots,n)$。

城市网络功能的度量指标

程连生：中国新城在城市网络中的地位分析．地理学报，1998，53(6)

(1) 反映城市网络连接程度的指标：

$$\beta=E/n \qquad (0\leqslant\beta\leqslant(n-1)/2)$$

$$H=E-n+q \qquad (0\leqslant H\leqslant(n-1)(n-2)/2)$$

式中，β 连接率； H 为环路指数； E 为线路数； n 为城市数； q 为网络数

(2) 反映城市网络伸展程度的指标：

$$D=\sum_i\sum_j S_{ij} \qquad (n(n-1)\leqslant D\leqslant n^2(n-1)/2)$$

$$\delta=\max\{S_{ij}\} \qquad (1\leqslant\delta\leqslant(n-1))$$

$$A=\sum_i\sum_j S_{ij}/n(n-1) \qquad (1\leqslant A\leqslant n/2)$$

式中，D 为伸展指数； δ 为网络直径； A 为 “点对”间平均线路数； S_{ij} 为最短径道矩阵元素。

(3) 反映城市网络扩展潜力的指标：

$$a=2H/(n-1)(n-2) \qquad (0\leqslant a\leqslant 1)$$

$$y=2E/n(n-1) \qquad (0\leqslant y\leqslant 1)$$

式中，a 为实际成环率； y 为实际结合度。

中心地体系的替代性分析公式

梁进社：中心地体系的替代性与点轴系统 地理学报，1998，53(增刊)

(1) 交通成本率：

$$r=v+F\cdot Q$$

式中，r 为单位距离单位交通量的成本； F 为以折旧出现的单位距离交通线的固定投入； v 为其可变成本率； Q 为交通量。

(2) 居民的消费支出方程：

$$pZ(i)+r(i)d(i)=y-u(i)$$

式中，$Z(i)$ 为一种综合商品和服务的数量； p 为价格指数； $u(i)$ 为 i 系统中每位居民在行政管理上的赋税； y 随居民的收入； $d(i)$ 为平均旅行距离。

(3) 各系统的福利度量：

$$w(i)=Z(i)-at(i)=[y-u(i)-r(i)d(i)/p]-at(i)$$

式中，$t(i)$ 平均旅行时间； a 为单位时间的价值。

城镇体系空间结构的分形维数及其测算

刘继生、陈彦光：城镇体系空间结构的分形维数及其测算方法，地理研究，1999，18(2)

(1) 聚集维数基本模型：

1) 城镇数目与相应半径的关系：

$$N(r)\propto r^{D_f}$$

式中，$N(r)$ 为半径为 r 的圆周内的城镇数目； D_f 为

分维

2）平均半径与城镇个数的关系：

$$R_s \propto S^{\frac{1}{D}}$$

$$R_s = \left\langle \left(\frac{1}{S} \sum_{i=1}^{S} r_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right\rangle$$

式中，R_s 为平均半径；r_i 为第 i 个城镇到中心城市的欧氏距离；S 为城镇个数；$\langle\cdots\rangle$ 表示平均；D 为分维。

3）城镇体系的空间分布密度与相应半径的关系：

$$\rho(r) \propto r^{D_f - d}$$

式中，$\rho(r)$ 为城镇体系的空间分布密度；欧氏维数取 $d=2$

（2）网格维数基本模型：

1）网格数与网格尺寸的关系

$$N(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-\alpha}$$

式中，$N(\varepsilon)$ 为被城镇占据的网格数；ε 为网格尺寸；α 为分维。

2）信息量与网格数的关系：

$$I(\varepsilon) = I_0 - D_1 \ln \varepsilon$$

式中，$I(\varepsilon)$ 为信息量；I_0 为常数；D_1 为信息维

（3）关联维数基本模型：

1）空间关联函数：

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i}^{N} \sum_{j}^{N} \theta(r - d_{ij}) \qquad (i \neq j)$$

式中，r 为码尺；d_{ij} 为两城镇的欧氏距离；θ 为 Heaviside 函数；$\theta(r - d_{ij}) = \begin{cases} 1 & (d_{ij} \leqslant r) \\ 0 & (d_{ij} > r) \end{cases}$。

2）空间关联函数与相应半径的关系：

$$C(r) \propto r^{\alpha}$$

式中，α 为分维。

城市标准地块线性分布计量模型

杨庆媛，杨华钧，邱道持：城市标准地块空间配置线性分析．资源科学，1999，21(3)

沿道路设置的标准地块数 M 模型：

$$M = \sum_{j=1}^{2} (M_{j1} + M_{j2})$$

式中，M_j 表示沿第 j 条道路设置的标准地块数；M_{j1} 表示由沿第 j 条道路上地级别结构所决定的标准地块数；M_{j2} 表示沿第 j 条道路上地级别中单元质量差异程度决定的标准地块数

约束性单元自动演化 CA 模型

黎夏，叶嘉安：约束性单元自动演化 CA 模型及可持续城市发展形态的模拟．地理学报，1999，54(4)

（1）基于状态的 CA 模型：

$$S^{t+1} = f(S^t, N)$$

式中，S 是状态；N 是邻近范围；f 是转换函数；t 是时间

（2）基于发展适宜性的 CA 模型：

$$S^{t+1}\{x,y\} = f(P_s^t\{x,y\})$$

$$P_s^t\{x,y\} = f(DS_s^t\{x,y\})$$

式中，S 为状态；P_s 为发展概率；DS_s 为发展适宜性

（3）基于约束性的 CA 模型：

$$S^{t+1}\{x,y\} = \begin{cases} \text{发展} & (G_d^t\{x,y\} = 1) \\ \text{部分发展} & (0 < G_d^t\{x,y\} < 1) \\ S^t\{x,y\} & (G_d^t\{x,y\} = 0) \end{cases}$$

$$G_d^{t+1}\{x,y\} = G_d^t\{x,y\} + \Delta G_d^t\{x,y\}$$
$$G_d\{x,y\} \in (0,1)$$

$$P_d^t\{x,y\} = f(S^t\{x,y\}, \text{cons}_{ld}^t, \text{cons}_{rd}^t \text{cons}_{gd}^t, N)$$
$$= f(S^t\{x,y\}, \text{cons}_d^t\{x,y\}, N)$$

$$\Delta G_d^t\{x,y\} = P_d^t\{x,y\} \times \text{cons}_d^t\{x,y\}$$

式中，$P_d^t\{x,y\}$ 是发展概率；S^t 是状态；cons_{ld}^t、cons_{rd}^t、和 cons_{gd}^t 分别是局部、区域和全局约束性；N 是邻近范围；$\text{cons}_d^t\{x,y\}$ 是总约束性；$\{x,y\}$ 是单元所在的位置；$G_d^t\{x,y\}$ 为反映单元 $\{x,y\}$ 状态连续变化的“灰度”值

区位商公式

阎小培，许学强：广州城市基本-非基本经济活动的变化分析．地理学报，1999，54(4)

$$LQ_{ij}=\frac{E_{ij}\cdot E_j}{E_i\cdot E}$$

式中，LQ_{ij} 为 j 城市 i 部门的区位商；E_{ij} 为 j 城市 i 部门的就业人数；E_i 为 j 城市在区域(或全国) i 部门的就业人数；E_j 为 j 城市就业总人数；E 为区域(或全国)就业总人数

地价 P 模型

刘伟，陈泽，濮励杰等：区域城镇土地比价体系研究．资源科学，2000，22(1)

$$P=\frac{R}{r}\left[1-\frac{1}{(1+r)^n}\right]$$

式中，R 为地租；r 为土地资本化率；n 为土地出让年限

城乡聚落动态变化的维数公式

杨山：发达地区城乡聚落形态的信息提取与分形研究——以无锡市为例．自然资源学报，2000，55(6)

$$\ln A(r)=\frac{2}{D}\ln P(r)+C$$

式中，$A(r)$ 代表以 r 为量测尺度的某一样本的面积；$P(r)$ 为同一样本的周长；C 为截距；$2/D$ 为斜率。维数 D 等于斜率除 2，其值在 1 到 2 之间，D 越大代表图形形状越复杂。当 D 等于 1.5 时，则代表图形处于布朗随机运动状态，越接近该值，稳定性越差。如果定义城市形态变化(一个随机过程) $B(t)$ 为布朗运动，并且 $B(t)$ 满足 $Var[B(t_2)-B(t_1)]\propto|t_2-t_1|^{2H}$ 由于 $B(t)$ 的图形只是某一次的取样图形，对于一定的 H，$B(t)$ 的所有取样都具有相同的分数维。且为：$D=2-H$，参数 H ($0<H<1$)在直观上表示了图形的粗糙度。

根据以上分析，可以把分形布朗运动分成 3 个完全不同的类：① $H=1/2$ 时，即 $D=1.5$ 时，$B(t_2)-B(t_1)$ 与 $B(t_3)-B(t_2)$ ($t_1<t_2$)是独立的，两者相关为 0，故图形处于最不稳定状态。② $H>1/2$ 时，即 $D<1.5$ 时，随机过程的增量间有正的相关值，故图形趋于简单。当 $H=1$ 时，图形在 t 方向的扩展必须以图形在幅度方向上相同的因子的扩展来补偿才能保持看上去一致，此时的图形的分数维为 $2-H=1$。③ $H<1/2$ 时，随机过程的增量间存在一个负的相关，一般此时的图形更为奇特，有较大的分数维。当 $H=0$ 时，便得到一个完全不同的随机行为，在 t 方向上任意的压缩或扩展 $B(t)$ 图形，看上去还是一样的，也即 $B(t)$ 的图形密集地充满了平面上的一个区域，即它的分数维为 2。

城市可持续发展的综合评价模型

许学强，张俊军：广州城市可持续发展的综合评价．地理学报，2001，56(1)

(1) 环境、经济、社会可持续指数：

$$I_m=\sum_{i=1}^{n}A_iX_i$$

式中，I_m 为环境可持续指数、经济可持续指数和社会可持续指数；n 为各指数所包含的主成分数目；A 为各主成分的贡献率；X 为各主成分的得分。

(2) 水平指数公式为：

$$I_1=\sum_{j=1}^{n}B_jX_j$$

式中，I_1 为水平指数；n 为城市可持续发展水平所包含指数的数目，现为 3；X_j 分别为环境可持续指数、经济可持续指数和社会可持续指数；B_j 为三指数的权重。

(3) 总体发展指数公式：

$$I_d=\begin{cases}\dfrac{1.732-X_1}{X_2-X_1}\\[2ex]\dfrac{X_1}{X_2-X_1}\\[2ex]DI\to\infty\end{cases}$$

式中，I_d 为发展指数；X_1、X_2 分别为不同时期环境、经济、社会可持续指数的平方根。

(4) 协调指数公式为：

$$I_c=\frac{x+y+z}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}}$$

式中，I_c 为协调指数；x，y 和 z 分别为环境、经济、社会可持续指数。

第十六章 旅游地理

公园中游客行为的 Markov 模型

Bertuglia C S, Tadei R: 国家公园利用的随机模型. Ecological Modelling, 1982,15

模型的目的是要计算在公园的每一个 I 区域内游客的平均数，微分方程为：

$$\dot{N}_j = sq_{oj} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{I} y_i p_{ij} - y_j$$

$$= q_{oj}\dot{N} + \sum_{i=1}^{I} y_i (q_{oi} q_{io} + p_{ij}) - y_j$$

$$(j = 1, 2, \cdots, I)$$

式中，N 是来公园的游客的平均总数；N_j 是在区域 j 的游客平均数；s 是每单位时间进入公园的游客平均数；$q_{oj} = \sum_{r=1}^{R} q_{or} q_{rj}$ 是一个旅客从公园外面进入区域 j 的概率，对于所有 R 个入口，这个概率是指通过入口 r 进入的概率 q_{or} 和从入口 r 移动到区域 j 的概率 q_{rj} 的总和；q_{io} 是一个游客从区域 i 转移到公园外面的概率；$y_i = N_i \lambda_i$ 是每单位时间离开区域 i 的游客的平均数；λ 是游客每单位时间离开区域 i 的速率；p_{ij} 是一个游客从区域 i 移动到区域 j 的概率。

室外娱乐需求分析模型

Reed K L, Rose K A, Whitmore R C: 室外娱乐需求大模型中的参数灵敏度的拉丁超立方体分析. Ecological Modelling, 1984, 24

(1) 模型的矩阵形式：

$$a = Qr + \Omega$$

式中，a 是表示所有娱乐景点的向量(旅游者 · d · a^{-1})；Q 是从人口中心地区到娱乐区旅行的概率矩阵；r 是所有人口中心地区的娱乐群体向量（每年产生的旅游者 · d）；Ω 是娱乐地区出境旅游者的向量(旅游者 · d · a^{-1})。

(2) Q 的元素模型：

$$q_{ij} = \frac{p_{ij} w_i}{\sum_j p_{ij} w_i}$$

式中，q_{ij} 是 Q 的元素；$p_{ij} = \dfrac{\exp(-k_j x_{ij})}{\sum_j \exp(-k_j x_{ij})}$ 是从人口中心地区 j 到娱乐区 i 旅行的概率，x_{ij} 是旅行时间，k_j 是决定各个地点的旅行时间函数斜率的系数；w_i 是对应于娱乐地吸引力的加权因子，$w = Sn$，S 是所有娱乐地区的有效活动质量分数的矩阵，n 是活动的参与率向量。

旅游地引力模型

张凌云：旅游地引力模型研究的回顾与前瞻. 地理研究，1989，8(1)

(1) 爱德华兹和丹尼斯距离函数式：

$$T_{ij} = P_i S_i^b A_j \exp(-\lambda C_{ij})$$

式中，T_{ij} 为某一时期在始点 i 和终点 j 之间地旅行次数；P_i 为始点 i 的某种人口计量单位；S_i 为从原点到终点地旅游吸引力；A_j 为终点 j 的某种吸引力计量单位；C_{ij} 为从 i 到 j 的旅行费用；λ，b 为参数。

(2) 希萨里奥和尼奇综合模型：

$$T_{ij} = \left[GP_i K_j^{(n+1)}\right] \frac{A_j e^{b(D_{ij})}}{K_i}$$

式中，A_j 为某一给定点的吸引力；K_j 为所有其他终点的竞争力，$(j \neq K)$，$K_i = \left[A_k e^{b(D_{ik})}\right]^{\alpha}$。

(3) 拉里奥市场引力模型：

$$I = \frac{\sqrt{AG} + B}{2}$$

式中，I 为旅游潜力指数；A 为旅游需求；B 为旅游供给；G 为权重系数。

(4) 点电荷吸引模型：

$$E = K\frac{RQ}{r^2}$$

式中，$R = \dfrac{100}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \dfrac{A_i}{P_i}$；$Q = \dfrac{A}{P}$；$K = \dfrac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} \dfrac{x_i}{X_i}$；$E$ 为旅游地吸引力；R 为旅游资源丰度指数；Q 为旅游客源丰度指数；$r = \dfrac{D}{300}$ 为距离指数，D 为客源地到资源地的距离；K 为介质系数；n 为旅游资源的统计种类数目；A_i 为 A 地区第 i 项旅游资源的数量；P_i 为全国第 i 项旅游资源的数量；A 为一地的旅游客源量；P

为全国的旅游客源量；x_i 为一地区第 i 项因子的设施数、业务量或水平值；X_i 为第 i 项因子的全国平均值。

(5) 旅游业布局吸引模型：

$$H_i = aE\frac{\partial P(x_i,y_i)}{\partial S(x_i,y_i)}$$

式中，H_i 为第 i 地的"引力场强度"；E_i 为第 i 地的的旅游业布局引力指数；$P(x_i, y_i)$ 为第 i 地的居民人数；$S(x_i, y_i)$ 为第 i 地的土地面积；a 为待估系数。

(6) 机会模型：

$$X_i = \sum \frac{A_k}{D_{ik}^{\alpha}}$$

式中，X_i 为始点 i 在设施方面的竞争点变量；A_k 为竞争点 k 的吸引力；D_{ik}^{α} 为 i 和 k 之间的距离；α 为常数。

(7) 市场竞争模型：

$$\begin{cases} Y_1 = a_1 + b_1 p_1 + c_1 p_2 \\ Y_2 = a_2 + b_2 p_1 + c_2 p_2 \end{cases}$$

相对于水库 2、水库 1 的交叉弹性为：

$$\frac{\Delta Y_1}{\Delta P_2} = -\frac{\partial Y_1}{\partial P_2}\cdot\frac{P_2}{Y_1} = C_1\cdot\frac{P_2}{Y_1}$$

式中，Y_1、Y_2 分别为去水库 1、2 的平均游客人数；P_1、P_2 分别为去水库 1、2 旅游者的平均花费；a_1、a_2 为常数；b_1、b_2 分别为水库 1 的回归系数；c_1、c_2 分别为水库 2 的回归系数。

(8) 概率引力模型：

$$\frac{dx_i}{dt} = CX_i\left(1 - \frac{X_i}{\sum_{i=1}^{n}\frac{N_j A_{ij}}{\sum A_{ij}}}\right) \quad (i = 1,2,\cdots,K)$$

式中，一种选择 i 的吸引力可完全决定于旅游者群体中面对此选择的特殊旅游者 j；x_i 为选择 i 旅游地的旅游者；C 为参数。

(9) 门槛半径的计算公式：

$$\begin{cases} Q' = \dfrac{F_c}{P - V_c} \\ R = f(Q') \end{cases}$$

式中，Q' 为保本量；F_c 为固定成本；V_c 为变动成本；P 为价格；f 为需求量与距离的函数。

旅游地开发评价模型

楚义芳：旅游地开发评价研究．地理学报，1991，46(4)

$$E = \sum_{k=1}^{n} Q_k P_k$$

式中，E 为评价结果值；Q_k 为第 k 个因子的权重值；n 为评价因子；P_k 为第 k 个因子的评价值。

有效温度 ET 模型

郭林海，赵昇，肖笃宁：沈阳市东郊森林风景区综合效益的潜力研究。自然资源，1992，1

$$T_e = T_a - 0.4(T_a - 10)\left(1 - \frac{f}{100}\right)$$

式中，T_a 为气温；f 为空气相对湿度。

游憩者流动的重力模型

吴必虎：上海城市游憩者流动行为研究．地理学报，1994，49(2)

$$R_{ij} = G\frac{E_i A_j}{(D_{ij})^b}$$

式中，R_{ij} 为某段时间内客源地到目的地之间的游憩者人数；E_i 为客源地的出游能力的表达；A_j 为目的地的吸引力大小的某种表达；D_{ij} 为 i 和 j 之间距离的某种表达；G 和 b 为经验常数。

旅游需求模型

牛亚菲：旅游供给与需求的空间关系研究．地理学报，1996，51(1)

(1) 客源地总旅游需求：

$$D_{总} = K_{总} IP$$

式中，$D_{总}$ 为总的旅游需求人数；I 为人均收入水平；P 为人口数量；$K_{总}$ 为经验参数。

(2) 某一客源地对某一旅游地的旅游需求：

$$D = K\frac{IPQ}{d^2}$$

式中，D 为对某一旅游地的旅游需求；d 为旅游地与客源地之间的距离；Q 为旅游地质量等级；P 为客源地人口数量；I 为客源地人均收入水平。

泰山旅游环境承载力利用强度分析模型

崔凤军，杨永慎：泰山旅游环境承载力及其时空分异特征与利用强度研究。地理研究，1997，16(4)

(1) 经济承载量测算模型：

$$D_e = \min(D_{e1}, D_{e2}, \cdots, D_{ei}, \cdots)$$

$$D_e = S_{Si} / D_{Di}$$

式中，D_e 为经济承载量；D_{ei} 为第 i 种经济要素形成的经济承载量；S_{Si} 为第 i 种要素的日供给量；D_{Di} 为第 i 种要素的人均日需求量。

(2) 当地居民心里承载量测算模型：

$$P_c = AP_a$$

式中，P_c 为当地居民心里承载量；A 为旅游区或其依托的居民点(城镇)面积；P_a 为当地居民不产生反感的游客密度最大值。

(3) 旅游环境容量的量测：

1) 总量模型

$$D_m = S / d$$

$$D_a = D_m(T / t)$$

式中，D_m 为某旅游区瞬时客流容量；D_a 为日客流容量；S 为旅游区游览面积；$d = \max(d_1, d_2, \cdots, d_i, \cdots)$ 为游人游览活动最佳密度，d_1 为植被被踩踏而能够正常恢复生长所容许的游人密度，d_2 为自然净化及人工清理各种污染物状况下所允许的游人密度，d_3 为游人因对个人空间需求而允许的心理密度，d_4 为因噪声等因子造成的游客感应气氛容许密度；t 为游人每游览一次平均所需时间；T 为每天有效游览时间。

2) 流量-流速模型

$$D_m = L / d'$$

$$D_a = (VT) / d'$$

式中，L 为游览区内游览线路总长度；d' 为游览线路上的游客合理间距；V 为游客的平均游览速度。

(4) 旅游环境承载力资源利用强度的时空分异：

1) 年容量利用强度计算公式：

年容量＝夏半年开放天数×合理日容量(夏)＋

冬半年开放天数×合理日容量(冬)

2) 月容量利用强度计算公式：

月容量＝月开放天数×合理日容量

3) 各游览区段的瞬时承载强度分异计算公式：

$$B = \frac{D_{msi} / \sum D_{msi}}{D_{mi} / \sum D_{mi}}$$

式中，B 为瞬时承载强度；D_{msi} 为第 i 区段某个时刻实际瞬时承载量；D_{mi} 为第 i 区的瞬时容量；$\sum$ 为加和。

城郊游憩活动的效益模型

赵羿，陈玮：发展城郊游憩活动的效益——以抚顺市高湾经济特区为例．生态学杂志，1998，17(5)

(1) 客源量模型：

$$Q = \frac{RTP}{S}$$

式中，Q 为旅游地年均客源量(人次)；R 为所属客源地的大城市人口数，既有效人口数(人)；T 为大城市人口年人均旅游次数(次)；P 为参与率；S 为大城市周末两日游或一日游范围的景区数目。

(2) 旅游容量模型：

$$C = \frac{A}{a} D$$

式中，C 为日旅游容量；A 为可游览面积；a 为每位游人应占有的合理面积；D 为周转率。

(3) 旅憩效益模型：

$$U = (at + m)p$$

式中，U 为旅游区每年的旅憩效益(万元)；a 为游客游憩 1 h 的平均花费(元·h^{-1})；t 为游客在旅游区的平均游憩时间；m 为游客平均支付的门票费用；p 为旅游区平均每年接待的游客数(万人次)。

风景区景观空间格局分析模型

唐礼俊：佘山风景区景观空间格局分析及其规划初探．地理学报，1998，53(5)

(1) 景观类型多样性指数(H)：

$$H = -\sum_{i=1}^{M} P_i \lg P_i$$

式中，P_i 是景观类型 i 所占面积的比例；M 为景观类型的数目。

(2) 优势度(D)：

$$D = H_{\max} + \sum_{i=1}^{M} P_i \lg P_i$$

式中，$H_{\max}$ 表示最大多样性指数。

(3) 均匀度(E):

$$E = H / H_{max} \times 100\%$$

式中，$H = -\lg\left[\sum_{i=1}^{M}(P_i)^2\right]$为修正了的 Simpson 指数；$H_{max} = \lg(M)$。

(4) 景观破碎度(C):

$$C_i = \frac{n_i}{A_i}$$

式中，C_i为景观i的破碎度；n_i为景观i的斑块数；A_i为景观i的总面积。

(5) 景观的分离度(I):

$$I_i = \frac{MNND_i}{\sqrt{A_i / n_i}}$$

式中，$MNND_i = \frac{\sum_{K=1}^{n_i} MNND_{iK}}{n_i}$；$I_i$为景观类型$i$的分离度；$n_i$为景观类型$i$的斑块数；$A_i$为景观类型$i$的总面积；$MNND_i$为景观类型$i$中斑块间平均最小距离；$NND_{iK}$为景观类型$i$中斑块$K$与同类相邻斑块间的平均最小距离。

旅游开发对植被的影响评价指标

李贞：旅游开发对丹霞山植被的影响研究 地理学报，1998，53(6)

(1) 敏感水平(L_s):

$$L_s = \frac{某景点游览人数}{进游览区的总人数}$$

(2) 景观重要值(I_i):

$$I_i = X_W + X_H + X_L$$

式中，I_i为景观重要值；X_W为相对物种系数；X_H为相对林高系数；X_L为相对木质藤系数。

(3) 旅游影响系数(TE):

$$TE = C_g + C_f / C_z$$

式中，TE为旅游影响系数；C_g为游人影响系数；C_f为砍伐影响系数，$C_{fi} = F_i / \sum_{i=1}^{n} F_i + F_{bi} / \sum_{i=1}^{n} F_{bi}$，$F_i$为砍伐总株数，$F_{bi}$为砍伐中保护种株数；$C_z$表示自然影响系数，$C_{zi} = Z_i / \sum_{i=1}^{n} Z_i + Z_{bi} / \sum_{i=1}^{n} Z_{bi}$，$Z_i$表示自然总株数，$Z_{bi}$表示自然总体中保护种株数。

旅游地客源市场的距离衰减模式

张捷，都金康，周寅康等：自然观光旅游地客源市场的空间结构研究 地理学报，1999，54(4)

(1) 指数模型:

$$\ln I_z = a - bd_z$$

(2) Pareto 模型:

$$\ln I_z = a - b\ln d_z$$

(3) 常对数模型:

$$\ln I_z = a - b[\ln d_z]^2$$

(4) 平方指数模型:

$$\ln I_z = a - b(d_z)^2$$

(5) 开方指数模型:

$$\ln I_z = a - b\sqrt{d_z}$$

式中，I_z为衡量两地作用的指标；a，b为系数(b为距离衰减指数)；d_z为距离。

风景名胜区与城市间的空间相互作用模型

王铮等：基于铁路廊道的中国国家级风景名胜区市场域分析 地理学报，2001，56(2)

(1) 国家级风景名胜区i对城市j的吸引力可用下式进行估算:

$$f(r) = PR\exp(-\beta r)$$

式中，$f(r)$为各国家级风景名胜区对各城市的旅游吸引力；P为各城市的人口数量；R为各国家级风景名胜区的资源强度；β是阻尼系数，它与交通形式有关；r为各国家级风景名胜区与各城市之间的交通距离。

(2) 参数β被证明有如下表达式:

$$\beta = \alpha\sqrt{T}$$

式中，α为常数；T为两地之间的平均交通距离，显然交通工具的改进可以缩短T值，就增加了相互作用强度，从而扩大其市场域范围。针对铁路交通，这里采用$\beta = 0.003\,22$。

(3) 由以上分析，国家级风景名胜区i对城市j的吸引力大小可用下式进行计算:

$$f_{ij}(r) = P_j R_i \exp(-0.003\,22 r_{ij})$$

式中，r_{ij} 为国家级风景名胜区 i 与城市 j 之间的交通距离，即“廊道长度”；R_i 国家级风景名胜区 i 的资源强度；P_j 为城市 j 的人口数量；则 $f_{ij}(r)$ 为国家级风景名胜区 i 对城市 j 的旅游吸引力。

(4) 对于每一城市 j，求出各国家级风景名胜区 i 对其的市场份额 a_{ij}：

$$a_{ij} = f_{ij}(r) \Big/ \sum_i f_{ij}(r)$$

式中，$f_{ij}(r)$ 为国家级风景名胜区 i 对城市 j 的旅游吸引力；$\sum_i f_{ij}(r)$ 为所有国家级风景名胜区对城市 j 的旅游吸引力之和。

(5) 国家级风景名胜区 i，可定义为：

$a_{ij} \geqslant k_1$ 的城市 j，为国家级风景名胜区 i 的一级市场域；$k_1 > a_{ij} \geqslant k_2$ 的城市 j，为国家级风景名胜区 i 的二级市场域；$k_2 > a_{ij} \geqslant k_3$ 的城市 j，为国家级风景名胜区 i 的三级市场域；式中，k_1，k_2，k_3 为国家级风景名胜区 i 的市场域阈值。

第十七章　区域地理

生产力布局线性规划模型

陈锡康：生产力布局的若干经济数学模型．地理学报,1981,36(1)

(1) 生产地接近消费地的生产力布局模型：

$$\min Z = E\left(\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}F_i b_{ij} X_{ij} + \sum_{i=1}^{m}F_i C_i X_i\right) + \sum_{i=1}^{m}F_i g_i W_i$$

约束条件：

$$\sum_{i=1}^{m} X_{ij} = B_j \qquad (j = 1,2,\cdots,n)$$

$$\sum_{j=1}^{n} X_{ij} = X_i \qquad (i = 1,2,\cdots,m)$$

$$X_i \leqslant A_i + \lambda_i W_i \qquad (i = 1,2,\cdots,m)$$

$$A_i + W_i \leqslant H_i \qquad (i = 1,2,\cdots,m)$$

$$\sum_{i=1}^{m} g_i W_i \leqslant G \qquad (i = 1,2,\cdots,m)$$

$$X_i \geqslant 0, W_i \geqslant 0 \qquad (i = 1,2,\cdots,m)$$

$$X_{ij} \geqslant 0 \qquad (i = 1,2,\cdots,m;\quad j = 1,2,\cdots,n)$$

式中，$\min Z$ 表示对等式右边求最小值；n 为消费地个数；m 为生产地个数；X_i 为第 i 个生产地的产量；W_i 为第 i 个生产地新建或扩建的生产能力；X_{ij} 为第 i 个生产地供应第 j 个消费地的该种产品数量；B_j 为第 j 个消费地的需要量；A_i 为第 i 个生产地原有的生产能力；λ_i 为第 i 个生产地新建或扩建的生产能力在计划期的动用系数；H_i 为根据当地条件第 i 个生产地最大可能达到的生产能力；g_i 为第 i 个地点新建(扩建)单位生产能力所需要的资金数量(基本建设投资额)；G 为增加生产能力而可能使用的资金数量；b_{ij} 为从第 i 个生产地到第 j 个消费地的单位产品运输费用；C_i 为第 i 个生产地的单位产品生产成本；E 为资金补偿期的定额(投资回收期的定额)。

(2) 生产地接近原料地的生产力布局模型：

$$\min Z = E\left(\sum_{k=1}^{u}\sum_{i=1}^{m}F_i a_{ki} Y_{ki} + \sum_{i=1}^{m}F_i C_i X_i\right) + \sum_{i=1}^{m}F_i g_i W_i$$

约束条件：

$$\sum_{i=1}^{m} Y_{ki} = D_k \qquad (k = 1,2,\cdots,u)$$

$$\sum_{k=1}^{u} Y_{ki} = rX_i \qquad (i = 1,2,\cdots,m)$$

$$X_i \leqslant A_i + \lambda_i W_i \qquad (i = 1,2,\cdots,m)$$

$$A_i + W_i \leqslant H_i \qquad (i = 1,2,\cdots,m)$$

$$\sum_{i=1}^{m} g_i W_i \leqslant G$$

$$Y_{ki} \geqslant 0 \qquad (k = 1,2,\cdots,u;\quad i = 1,2,\cdots,m)$$

$$X_i \geqslant 0, W_i \geqslant 0 \qquad (i = 1,2,\cdots,m)$$

式中，u 为原料产地个数；m 为生产地个数；Y_{ki} 为第 k 个原料地运给第 i 个生产地的原料数量；D_k 为第 k 个原料地的原料供应量；r 为生产单位产品所消耗的原料数量；a_{ki} 为第 k 个原料地到第 i 个生产地原料的单位运价；C_i 为第 i 个生产地生产单位产品的成本(不包括原料运费)。

(3) 生产地接近原料地与消费地的生产力布局模型：

$$\min Z = E\left(\sum_{k=1}^{u}\sum_{i=1}^{m}F_i a_{ki} Y_{ki} + \sum_{i=1}^{m}F_i C_i X_i + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}F_i b_{ij} X_{ij}\right) + \sum_{i=1}^{m}F_i g_i W_i$$

约束条件：

$$\sum_{i=1}^{m} Y_{ki} \leqslant D_k \qquad (k = 1,2,\cdots,u)$$

$$\sum_{k=1}^{u} Y_{ki} = rX_i \qquad (i = 1,2,\cdots,m)$$

$$X_i \leqslant A_i + \lambda_i W_i \qquad (i = 1,2,\cdots,m)$$

$$A_i + W_i \leqslant H_i \qquad (i = 1,2,\cdots,m)$$

$$\sum_{i=1}^{m} g_i W_i \leqslant G$$

$$\sum_{i=1}^{m} X_{ij} = B_j \qquad (j = 1,2,\cdots,n)$$

$$Y_{ki} \geqslant 0 \qquad (k = 1,2,\cdots,u; \quad i = 1,2,\cdots,m)$$
$$X_i \geqslant 0, W_i \geqslant 0 \quad (i = 1,2,\cdots,m)$$
$$X_{ij} \geqslant 0 \qquad (i = 1,2,\cdots,m; \quad j = 1,2,\cdots,n)$$

式中，有关符号同上。

(4) 企业分类型情况下的生产力布局模型：

$$\min Z = E\left(\sum_{k=1}^{u}\sum_{i=1}^{m} F_i a_{ki} Y_{ki} + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} F_i b_{ij} X_{ij} - \sum_{i=1}^{m}\sum_{l=1}^{v} F_i C_i^l X_i^l\right) + \sum_{i=1}^{m}\sum_{l=1}^{v} F_i g_i^l W_i^l$$

约束条件：

$$\sum_{i=1}^{m} Y_{ki} \leqslant D_k \qquad (k = 1,2,\cdots,u)$$

$$\sum_{k=1}^{u} Y_{ki} = \sum_{l=1}^{v} r^l X_i \qquad (i = 1,2,\cdots,m)$$

$$X_i^l \leqslant A_i^l + \lambda_i^l W_i^l \qquad (i = 1,2,\cdots,m; l = 1,2,\cdots,v)$$

$$\sum_{l=1}^{v} A_i^l + \sum_{l=1}^{v} W_i^l \leqslant H_i \qquad (i = 1,2,\cdots,m)$$

$$\sum_{j=1}^{n} X_i^l = \sum_{l=1}^{v} X_i^l \qquad (i = 1,2,\cdots,m)$$

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{l=1}^{v} g_i^l W_i^l \leqslant G$$

$$W_i^l \leqslant J^l \qquad (l = 1,2,\cdots,v; i = 1,2,\cdots,m)$$

$$(W_i^l)^2 \geqslant q^l W_i^l \qquad (i = 1,2,\cdots,m; l = 1,2,\cdots,v)$$

$$\sum_{i=1}^{m} X_{ij} = B_j \qquad (j = 1,2,\cdots,n)$$

$$\left.\begin{array}{ll} Y_{ki} \geqslant 0 & (k = 1,2,\cdots,u; i = 1,2,\cdots,m) \\ X_{ij} \geqslant 0 & (i = 1,2,\cdots,m; j = 1,2,\cdots,n) \\ X_i^l \geqslant 0 & (i = 1,2,\cdots,m; l = 1,2,\cdots,v) \\ W_i^l \geqslant 0 & (i = 1,2,\cdots,m; l = 1,2,\cdots,v) \end{array}\right\}$$

式中，v 为企业类型的数目；W_i^l 为 i 地新建(扩建)的 l 型企业的原有生产能力；A_i^l 为 i 地 l 型企业的原有生产能力；X_i^l 为 i 地 l 型企业的生产量；g_i^l 为 i 地建设 l 型企业的单位生产能力所需要的资金(基建投资额)；C_i^l 为 i 地 l 型企业的单位产品生产成本(不包括原材料运费)；r^l 为 l 型企业的原材料消耗定额；λ_i^l 为 i 地新建 l 型企业生产能力的动用系数；J^l 为 l 型企业最大生产能力；q^l 为 l 型企业最低生产能力。

水资源数量的估算模型

贺伟程：北京市水资源初步评价．自然资源 1982，3

(1) 地下水补给量 U_m 模型：

$$U_m = R_{um} + U_k + E_{um} + q_m$$

式中，R_{um}、U_k 和 E_{um} 分别为开采情况下的河川基流量、山前侧渗量和潜水蒸发量；q_m 为地下水开采净消耗。

(2) 水资源总量 W_i 模型：

$$W_i = R_m + R_p + U_p + U_k - q_m = R_{up}$$

式中，R_m 和 R_p 分别为山区和平原的河川径流量；U_p 为平原降水补给量；U_k 为山前侧渗量；q_m 为山区地下水开采净消耗；R_{up} 为平原地下水的河道排泄量。

区域分析公式

陆大道：人文地理学中区域分析的初步探讨．地理学报，1984，39(4)

(1) 计算人口、产业、销售潜力分布的潜力公式：

$$I_{ij} = k\frac{W_i P_i^{a_i} \cdot W_j P_j^{a_j}}{d_{ij}^b}$$

式中，P_i 和 P_j 分别为地区 i 和 j 的人口数；W_i 为 P_i 的权数；W_j 为 P_j 的权数；a_i 和 a_j 分别为 P_i 和 P_j 的指数。

(2) 频率分布分析：

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{k} f_i x_i}{n}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{i} g_i y_i}{n}$$

式中，$\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为所有点横坐标和纵坐标的算主平

均值；x_i 为 x 轴上数据间隔分级的中点值；y_i 为 y 轴上数据间隔分级的中点值；f_i 为 x_i 所在数据等级的绝对频数；g_i 为 y_i 所在数据等级的绝对频数；k 和 i 分别为 x 和 y 轴上数据等级数；n 为点的总数。

动态投入-产出模型

Tamura H, Ishida T：区域环境污染的总排放量控制的环境-经济学模型——投入产出方法. Ecological Modelling, 1985, 30

（1）矩阵形式的静态投入-产出模型：

$$X + MX = AX + D[\alpha]GX + F$$

式中，$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix}$，$X_i$ 是部门 i 生产的日用品 i 的总产量；$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & m_n \end{bmatrix}$，$m_i$ 是日用品 i 的投入系数；$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$，$a_{ij}$ 是指部门 j 每生产一个单位的日用品 j 所产生的日用品 i 的投入量，称为边际投入系数；$D = \begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{n1} & \cdots & d_{nn} \end{bmatrix}$，$d_{ij}$ 是指部门 j 每排放一个单位污染物所需的日用品 j 的投入量，称为排放污染物的边际投入系数；$[\alpha] = \begin{bmatrix} \alpha_1 & & & 0 \\ & \alpha_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \alpha_n \end{bmatrix}$，$\alpha_i$ 是部门 i 的污染物排放速率；$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix}$，$F_i$ 是日用品 i 的最终需求；$G = \begin{bmatrix} g_1 & & & 0 \\ & g_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & g_n \end{bmatrix}$，$g_i$ 是部门 i 每生产一个单位的日用品 i 所排出的污染物，称为污染系数。

（2）本区域排放的污染物的总量：

$$P = \sum_{j=1}^{n}(1-\alpha_j)g_j X_j + p_c$$

式中，p_c 表示消费者排放的污染物。

（3）最终需求向量 F 可分为三部分：

$$F = C + H_1 + H_2$$

式中，C 是消费量；H_1 是生产活动的投资；H_2 是污染物排放活动的投资。

区域发展可更新资源的最大化函数及运动方程

Walker R：区域发展和可更新资源的开发. Ecological Modelling, 1987, 37

（1）问题是要使下面的函数最大化：

$$F_1[K_1(T) + qF_2[K_2(T)]$$

式中，q 是可重复利用的商品的价格；T 是终止时间；K_i 是在 $i(i=1,2)$ 部分中累积的资本；1 表示新创造的部分，2 表示重复利用的部分；F_i 是兑换率。

已知一个固定的储蓄率 s 在时间 t 可用于投资的输出量为：

$$s\{F_1[K_1(t) + qF_2[K_2(t)]\}$$

（2）运动方程如下：

$$\dot{K}_1 = B(t)s\{F_1[K_1(t) + qF_2[K_2(t)]\}$$

$$\dot{K}_2 = [1 - B(t)]s\{F_1[K_1(t) + qF_2[K_2(t)]\}$$

式中，$B(t)$ 是在时间 t，新创造的产品方面投资的数量。

地域分工与区位优势分析公式

杨吾扬，梁进社：地域分工与区位优势. 地理学报，1987，42(3)

（1）巴郎斯基的地理分工公式：

$$C_v > C_p + t$$

式中，C_v 和 C_p 分别为两地某商品价格；t 为运费。

（2）绝对区位优势：

$$E_{ij}^{(k)} = \frac{C_i^{(k)} + T_{ij}^{(k)}}{U_i^{(k)}}$$

式中，$C_i^{(k)}$ 为第 i 个子区域或城市生产第 k 种产品的成本；$U_i^{(k)}$ 为产品效用；$T_{ij}^{(k)}$ 为第 i 个子区域运输第 k 种单位产品到第 j 个子区域所需的运费。

（3）相对区位优势：

$$\overline{E}_{ij}^{(k)}=\frac{E_{ij}^{(k)}}{E_{ji}^{(k)}}$$

式中，$\overline{E}_{ij}^{(k)}$ 越小，则说明其发展第 k 种产品的相对区位优势越大

国土规划控制模型

樊杰：煤矿地区国土总体规划的初步研究，地理研究，1988，7(1)

$$X=AX+x$$

式中，$X=|x_i|n$ 为各生产部门的规模大小；$x=|x_i|n$ 为对应各项的最终产品；$A=|a_{ij}|_{n\times n}$ 为部门的单位产出所需部门的投入量。

"其他"一项规模的计算公式

$$x_{nj}=\sum_z Y_Z=\sum_z \gamma_z \beta_z y_z$$

式中，x_{nj} 为第 j 行"其他"项目的规划，它含有若干个(以 Z 表示，因 j 而异)部门；Y_Z、y_z 分别为各部门规划产值数和现状产值数，其二者之比为 γ_z；β_z 为修正因数．然后将该式带入初步模型进行运算，求得一个 $i>n$ 的 i 元一次方程，这就是控制模型。

区域分析模型

韦省民：关中——陕北过渡带区域分异的判别分析，地理研究，1988，7(1)

(1) 区域分析的判别函数：

$$Y=C_1X_1+C_2X_2+\cdots+C_kX_k+\cdots+C_nX_n=\sum_{k=1}^{n}C_kX_k$$

式中，X_k 为第 k 个因子值($k=1,2,\cdots,N$，N 为因子数)；C_k 为第 k 个因子的判别函数，由 Fisher 准则决定。

(2) 判别指标：

$$Y_c=\frac{m_1\overline{Y}_A+m_2\overline{Y}_B}{M}$$

式中，m_1 和 m_2 分别为 A，B 二类的样本数；M 为总样本数；$\overline{Y}_A$，$\overline{Y}_B$ 分别为二类的判别函数的均值，分别可表达为：

$$\overline{Y}_A=\sum_{k=1}^{N}C_k\overline{X}_{k_A}=\sum_{k=1}^{N}\sum_{i=1}^{m_1}C_kX_{k_iA}$$

$$\overline{Y}_B=\sum_{k=1}^{N}C_k\overline{X}_{k_B}=\sum_{k=1}^{N}\sum_{i=1}^{m_2}C_kX_{k_iB}$$

(3) 相关系数：

$$r_k=\sqrt{\frac{m_1m_2}{M}}\cdot\frac{X_{kA}-X_{kB}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{M}\left(X_{k_i}-X_k\right)^2}}$$

式中，r_k 为单因子 X_k 对判别分析的相关系数，选式中，使 r 达到最大的几个因子。

投资折算模型

张书义，任子幽：内蒙古黄土高原水土保持规划经济效益分析　水土保持通报，1988，8(1)

$$\sum_{t=1}^{n}\frac{F}{p}=(1+i)^t$$

式中，F 为折算到基准年的投入；p 为第 t 年的投入；i 为经济报酬率；n 为时段年限

地区或流域可利用的水资源总量计算模型

黄万里：增进我国水资源利用的途径　自然资源学报，1989，4(4)

考虑一地区或流域的水资源，可从式中，任一地点上降水和用水的情形出发，并按受水面积集合起来：设某一地面点上降雨率或雪露冰等的融化率为 $\frac{\partial P}{\partial t}$，式中，$P$ 为 t 时间的雨量；入渗率为 $\frac{\partial I}{\partial t}$，$I$ 为 t 时间的入渗量；$\frac{\partial^2 Q}{\partial x\partial z}$ 为单位面积 dxdz 上的单面流率，Q 为流率；$y=y(t)$ 为随时间演变的地面流水深。按连续方程原理：

(1) 当 $\frac{\partial y}{\partial t}>0$：

$$\frac{\partial P}{\partial t}=\frac{\partial I}{\partial t}+\frac{\partial y}{\partial t}+\frac{\partial^2 Q}{\partial x\partial z}$$

在降小雨或降雨初期，地面还未湿润，地面上的坑洼还未充水。其实可能入渗率 $\frac{\partial I}{\partial t}$ 很大，上式后两项皆等于 0，所以当 $\frac{\partial y}{\partial t}\leqslant 0$ 时，有 $\frac{\partial I}{\partial t}=\frac{\partial P}{\partial t}$。

(2) 水的合理指标：

$$P_c\approx I_c\approx\int_0^{tD}\frac{\partial P}{\partial t}\mathrm{d}t-\int_0^{tD}\frac{\partial^2 Q}{\partial x\partial z}\mathrm{d}t$$

式中，tD 为年内降水的历时；P_c 和 I_c 相应是年内有效降水量或入渗量。

(3) 可积潜流量：

$$G = G_s + G_d$$

式中，浅层潜流量 G_s 一部分是入渗量 I_c 所供给的，一部分是由地域以外流来的，属于客水的 I_c 所提供的，总之，是主客 $I_c \approx P_c$ 的产物，在计算大地域总水资源量时不应重复；深层潜流量 G_d 大都由域外客水所提供，对于本地域是一种额外的水源。对于包括地下水露头的大地域则 G_d 和 $I_c \approx P_c$ 是重复的。

综上而论，一地区或流域(面积 A)可利用的水资源总量 $V(m^3 \cdot a^{-1})$ 应是主客水资源量的总和，即 $V = \int_A P_c dA + G_d + Q_{yc}$。

物流场模型

王志国：物流场论及其在经济分析中的应用．地理学报，1990，45(1)

(1) 物流场强度：

$$\overline{E} = \sum_i \left(\frac{P_i}{\sum_i P_i} \overline{E}_i \right)$$

式中，i 表示第 i 个区域；$P = \sum_j Q_{0,j} L_j$ 为物流力，$Q_{0,j}$ 为物流源点 D_0 与 D_j 之间的物流量，L_j 为其间的物流输运路程；$\overline{E}$ 为物流场强度。

(2) 物流位势：

$$U_{ij} = \frac{Q_{i,j}}{Q_i}$$

式中，U_{ij} 为 D_j 对 D_i 的物流绝对位势。

(3) 物流密度与国土开发水平：

$$H = \lambda E$$

式中，H 为国土开发水平；λ 为物流密度；E 物流场强度。

商业中心的区位格局及优势度分析模型

杨成谋：兰州市商业中心的区位格局及优势分析．地理研究，1990，9(1)

(1) 商业中心功能指标计测公式：

$$P_{ij} = \frac{S_j^\alpha \cdot D_{ij}^\beta}{\sum_{j=1}^{n} S_j^\alpha \cdot D_{ij}^\beta}$$

$$S_{ij} = C_i P_{ij}$$

式中，P_{ij} 为 i 地区消费者(居民)光顾 j 商业中心的概率；S_{ij} 为 i 地区消费者用于 j 商业中心的购物费用；S_j 为 j 商业中心的吸引力，以商店规模表示；D_{ij} 为 i 居住区到 j 购物中心的距离；C_i 为 i 居住区购物总开支；α、β 为经验系数。

(2) 区位优势度的数学模型：

1) 加权平均模型：

$$E_j^{(1)} = \sum_{i=1}^{n} a_i \frac{X_{ij}}{L_{ij}}$$

式中，E_j 为第 j 个商业中心的区位优势度；X_{ij} 为第 j 个商业中心的第 i 个区位因子的实测值；L_{ij} 为第 j 个商业中心第 i 个区位因子的饱和值；a_i 为加权系数。

2) 希尔伯特模式：

$$\boldsymbol{E}_j^{(2)} = |\boldsymbol{X}| = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} W_i^a X_{ij}^a}$$

式中，W_i^a 为加权因子，$W_i^a = 1$；X_i 为区位因子。

资源评价指标模型

郑一环，楼兴甫：试论资源战略．自然资源学报，1990，5(4)

(1) 使用价值形态表示的资源评价指标计算公式：

$$K_1 = \frac{Q_Z}{L_Z}$$

$$K_2 = Q_Z - L_Z$$

(2) 以价值形态来表示的资源评价指标计算公式：

$$K_3 = \frac{P_Z}{D_Z}$$

$$K_4 = P_Z - D_Z$$

式中，$K_{1\text{-}4}$ 为资源开发利用可能得到的总经济效益；Q_Z 为资源开发利用可能创造的使用价值总量(劳动量或劳动成果)；L_Z 为资源开发利用可能需要的劳动消

耗总量(劳动量或折算劳动成果)；P_Z 为资源开发利用可能创造的总价值(货币量)；D_Z 为资源开发利用需要的全部费用(货币量)。

上述两种表示方法的四个公式，还可以进一步分析，得到下式：

$$K_3=\frac{P_Z}{D_Z}\approx\frac{\sum\sum P_i q_i}{\sum\sum P_c L_Z}$$
$$\approx\frac{\sum\sum P_i q_i}{\sum\sum(P_{mi}E_{mi}+P_{vi}E_{vi})}$$

式中，P_i 为资源开发利用生产的某种单位产品(或单位工作量)的价值；q_i 为资源开发利用生产的某种物质产品的产量；P_c 为资源开发利用消耗单位劳动的价值；P_{mi} 为资源开发利用消耗单位物化劳动产品的价值；E_{mi} 为资源开发利用消耗的物化劳动产品量；P_{vi} 为资源开发利用消耗单位活劳动价值；E_{vi} 为资源开发利用消耗的活劳动量。

人口扩散与空间相互作用模型

王铮，邓峰，杨云彦：人口扩散与空间相互作用的联系．地理研究，1991，10(1)

(1) 均匀地域上的人口概率密度函数：

一个均匀地域，其上分布有充分多的居民点，设出生居民点 a 的全体人口的人口集合为 A，$A_\tau\subset A$，A_τ 的成员是在同一时间单元 $[\tau,\tau+\Delta\tau]$ 内出生的人口子集团，则：

$$f(r,t)=\frac{1}{2\pi D(t-\tau)}\exp\left[-r^2/2D(t-\tau)\right]$$

式中，$f(r,t)$ 为空间上的人口概率密度函数；r 为与 a 点的距离；t 为时间；$t-\tau$ 为人口群 A_τ 的年龄；$D=\frac{h^2}{2T}$ 为扩散系数，h 为域元的“直径”或“边长”，T 为一个域元扩散到另一个紧邻域元所需的时间。

(2) 居民点的人口迁出率：

$$k(t)=\int_0^{\infty}\int_0^{2\pi}w(r,t)r\mathrm{d}r\mathrm{d}\theta=kg(t)$$

式中，$k(t)$ 为人口集团 A 的人口外迁率；$w(r,t)$ 为人口的空间表现；k 为归一化常数；$g(t)$ 为人口群 A 参与迁移人口的年龄分布，$g(t)\sim(t-\tau)^{1/2}\exp[-a(t-\tau)]$，$a$ 为与人口过程中地理条件有关的常数。

$$f(r,t)=\frac{ck_1}{2\pi Dt}\exp\left(-r^2/2Dt\right)+\frac{k_2}{2\pi Dt}\exp\left(-r^2/2Dt\right)$$

式中，$f(r,t)$ 为人口的空间分布；t 为年龄；c 为双亲年龄与儿童年龄比的数学期望。

(3) 人口位势场：

1) 均质地域上：

$$G(r)=k_1\exp\left(-\sqrt{\frac{2ca\pi}{D}}r\right)+k_2\exp\left(-\sqrt{\frac{2a\pi}{D}}r\right)$$

式中，$G(r)$ 为位势函数；k_1、k_2、c、a、D 为与地理条件有关的常数。

2) 非均匀地域上：

$$G(r_{ij})=k_1\left(\frac{Q_i}{Q_j}\right)^{\alpha}e^{-br_{ij}}$$

式中，$G(r_{ij})$ 为 i 点对 j 点的引力势；r_{ij} 为 i 点到 j 点的距离；Q_i 为 i 的人均资源；Q_j 为 j 的人均资源；α、b 为经验常数。

商品购销地域分布的计算公式

李冬玉：商品购销地域分布研究方法初探．地理研究，1992，11(1)

(1) 商品购销基地、分布状况及影响因素：

1) 集中指数计算公式

$$C=100-\frac{H}{P}\times100$$

式中，C 为某地理要素的集中指数；H 为该要素所在地域的人口数；P 为全区域的总人口数。

2) 相关系数计算公式

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}}$$
$$(i=1,2,\cdots,n)$$

式中，r 为要素 x 和 y 的相关系数。

(2) 商品供求状况及商品流向：

1) 购销比计算公式

$$R_i=\frac{P_i}{S_i}$$

式中，R_i 为 i 地某商品的购销比；P_i 为 i 地商品部门对该商品的购进量；S_i 为 i 地商业部门对该商品地销

售量。

2）购销区位商计算公式

$$Q_i = \frac{\frac{P_i}{S_i}}{\frac{P}{S}}$$

式中，Q_i 为 i 地某商品对于高层次地区的区位商；P_i 为 i 地某商品购进量；S_i 为 i 地区商品销售量；P 为高层次地区同种商品购进量；S 为高层次地区同种商品销售量。

洪水经济损失敏感度分析计算公式

张利项，陆中臣：黄河下游泛区洪水经济损失敏感度分析。地理研究，1992，11(4)

(1) 敏感系数计算公式：

$$L_j = \sum_{i=1}^{7} k_i x_{ij}$$

式中，$x_i = \frac{a_i}{\max(a_i)_n}$；$L_j$ 为第 j 个区域的敏感系数；x_{1j}、x_{2j}、…、x_{7j} 分别为第 j 区域标准化后的各参数；k_1，k_2，…，k_7 分别为各参数对应的权重；a_i 为所选取的参数。

(2) 洪水经济损失敏感系数计算公式：

$$L_j = k_1 \cdot a_{1j}/a_{1m} + k_2 \cdot a_{2j}/a_{2m} + k_3 \cdot a_{3j}/a_{3m} + k_4'(a_{1j} - a_{2j} - a_{3j})/(a_1 - a_2 - a_3)_m + k_7 \cdot a_{7j}/a_{7m}$$

式中，L_j 为第 j 个区域的敏感系数；a_{1j} 为第 j 个区域单位面积社会总产值；a_{2j} 为第 j 个区域单位面积工业总产值；a_{3j} 为第 j 个区域单位面积农业总产值；a_{7j} 为第 j 个区域单位面积人均社会总产值；a_{1m}，a_{2m}，a_{3m}，$(a_1 - a_2 - a_3)_m$，a_{7m} 分别为相应各参数中的最大值；k_1，k_2，k_3，k_4'，k_7 均为待确定的各参数的权重。

乡村功能类型及其地域模式

杜建衢，郭焕成：黄淮海地区乡村功能类型及其地域模式。地理研究，1992，11(4)

(1) 稳定系数计算公式：

$$K_j = 1 - \frac{Cv_j}{Cv_{j\max}}$$

$$Cv_j = \left(\frac{1}{t}\sum_{i=1}^{t} x_{ij}\right) \Big/ \sqrt{\frac{1}{t-1}\sum_{i=1}^{t}\left(x_{ij} - \bar{x}_j\right)}$$

式中，K_j 为稳定系数；$Cv_{j\max}$ 为最大时间变异系数；Cv_j 为时间变异系数；t 为统计年数；x_{ij} 为待筛指标元素；$\bar{x}_j = \frac{1}{t}\sum_{i=1}^{t} x_{ij}$，$(i = 1,2,\cdots,t,\ j = 1,2,\cdots,13)$。

(2) 平方欧氏距离计算公式：

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^{m}\left(x_{ik} - x_{jk}\right)^2 \quad (i,j = 1,2,\cdots,n,\ n = 360,\ m = 4)$$

式中，d_{ij} 为地域单元之间的距离。

经济区总量增长的计算公式

彭清：产业结构的成长与经济区的扩张。地理研究，1993，12(1)

$$\sum_{i=1}^{n} T_{ti} = T_t$$

$$\sum_{i=2}^{n} G_{oi} = G_o$$

$$\sum_{i=3}^{n} T_{oi} = T_o$$

$$E_r = \sum_{i=1}^{n} T_{ti} \cdot G_{oi}/T_{oi} - T_t \cdot G_o/T_o$$

式中，G_{oi}，G_o 分别代表经济区基年第 i 产业的产出和国民经济总产出；T_{oi}，T_o 分别为经济区基年对第 i 产业的投入和国民经济的总投入；T_{ti}，T_t 分别为经济区第 n 年对 i 产业的投入和国民经济总投入；E_r 为国民经济产出获得的增长。

$$\Delta M_j = \Delta E_d + \Delta E_{ic} = \Delta E_d + \Delta\sum_{b=1}^{L} E_{idb} + \Delta\sum_{f=1}^{M} E_{idf}$$

式中，ΔM_j 为主导产业的推动企业 j 的建立和扩大在其所在区域所产生的产出总量变化；ΔE_d 为直接来自这个推动型企业本身产出量的变化；ΔE_{id} 为因推动型企业的建立和扩大间接引起的区域相关部门和行业产出量的变化；$\Delta\sum_{b=1}^{L} E_{idb}$，$\Delta\sum_{f=1}^{M} E_{idf}$ 分别为前后影响的各类相关部门或行业 b，f 的产出量。

增长极理论分析及选择模型

李小建，苗长虹：增长极理论分析及选择研究。地理研究，1993，12(3)

(1) 推进型产业选择的指标：

1) 产业关联度：

产出扩散能力

$$x_1 = n\sum_{i=1}^{n} b_{ij} \Big/ \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} b_{ij}$$

就业关联系数

$$x_2 = n\sum_{i=1}^{n} l_i b_{ij} \Big/ \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} l_i b_{ij}$$

式中，b_{ij} 为列昂捷夫矩阵中的元素；n 为投入产出表中的部门个数；l_i 为某产业单位产出的就业人数。

2) 技术创新能力：

$$x_3 = w_a l_n\left(T_{\text{ep}i2} / T_{\text{ep}i1}\right) / l_n\left(T_{\text{ep}2} / T_{\text{ep}1}\right) + w_b \cdot T_{\text{ep}i2} / T_{\text{ep}2}$$

式中，$T_{\text{ep}} = \left(\frac{y}{L}\right)^{1-k/y}\left(\frac{k}{y}\right)^{-k/y}$；$T_{\text{ep}i}$、$T_{\text{ep}}$ 分别为 i 产业全要素生产率和区域有关产业总体的全要素生产率，1 和 2 分别为基期和对比期；w_a，w_b 分别为相对技术进步速度和相对技术水平的权重；Y 为产出量；K，L 为资金和劳动的投入量。

3)比较优势系数计算公式

$$x_4 = \frac{1}{2}\left(\frac{R_i}{\overline{R}} + \frac{R_i}{\overline{R}_i}\right)$$

式中，R_i、$\overline{R}$、$\overline{R}_i$ 分别为某区域中产业资金利润率、某区域中所有产业平均资金利润率和全国产业的资金利税率。

4) 收入弹性指标计算公式

$$x_5 = \left(\frac{\mathrm{d}\theta_i}{\theta_i} \Big/ \frac{\mathrm{d}p}{p}\right) \Big/ \left(\frac{\mathrm{d}\theta}{\theta} \Big/ \frac{\mathrm{d}p}{p}\right) = \frac{\mathrm{d}\theta_i}{\theta_i} \Big/ \frac{\mathrm{d}\theta}{\theta} \approx \frac{\Delta\theta_i}{\theta_i} \Big/ \frac{\Delta\theta}{\theta}$$

式中，$\frac{\Delta\theta_i}{\theta_i}$、$\frac{\Delta\theta}{\theta}$ 分别为同一时段内 i 产业生产产品的需求增长率和研究区域的总产品的需求增长率。

(2) 区位选择的指标：

1) 增长潜力指数计算公式

$$y_1 = (k_1 k_2 \cdots k_n)^{\frac{1}{n}}$$

式中，y_1 为某区位的增长潜力指数；$k_1 \sim k_n$ 分别为反映增长潜力特性的可比指标。

2) 增长环境指数计算公式

$$y_2 = (b_1 b_2 \cdots b_m)^{\frac{1}{m}}$$

式中，y_2 为某区位的增长环境指数；$b_1 \sim b_m$ 分别为反映增长环境的可比指标。

区域差异指数的计算公式

欧阳南江：改革开放以来广东省区域差异的发展变化. 地理学报，1993，48(3)

$$M_{W'} = \sum_{i=1}^{N} \frac{|Y_i - Y|}{Y} \frac{f_i}{n} \times 100\%$$

式中，$M_{W'}$ 为人均收入差异系数；n 为全省总人口；f_i 为第 i 个县的总人口；Y_i 为第 i 个县的人均收入；Y 为全省人均收入；N 为县的个数。

结构变动因素对能源消费增长的影响模型

李俊：中国区域能源供求及其因素分析. 自然资源，1994，2

$$\Delta E = P_0 \sum_i \Delta a_i e_{io}$$

式中，P 为总产值；e_{io} 为能源利用效率；a 为单个工业占总产值的比重。

区域开发的理论模式

杨吾扬，梁进社：论我国区域开发的理论模式. 地理研究，1994，13(3)

1. 成本-效益分析模型

(1) 折(贴)现和折现率计算公式：

$$R = \frac{1}{(1+r)^n}$$

式中，R 为折现系数；r 为折现率；n 为年数。

(2) 经济内部收益率计算公式：

$$\sum_{t=1}^{n}(C_{\text{i}} - C_{\text{o}})_t (1 + E_{\text{irr}})^{-t} = 0$$

式中，C_{i} 为现金流入量；C_{o} 为现金流出量；$(C_{\text{i}} - C_{\text{o}})_t$ 为第 t 年的净现金流量；E_{irr} 为经济内部收益率；n 为计算期。

(3) 经济净现值和经济净现值率计算公式：

$$E_{\text{npv}} = \sum_{t=1}^{n}(C_{\text{i}} - C_{\text{o}})_t (1 + i_{\text{c}})^{-t}$$

$$E_{npvr} = \frac{E_{npv}}{I_p}$$

式中，E_{npv} 为经济净现值；i_c 为社会折现率；E_{npvr} 为经济净现值率；I_p 为投资现值。

(4) 投资回报期计算公式：

投资回收率 = 累计净现金流量开始出现正值年份数 − 1 + $\frac{\text{上年累计净现金流量绝对值}}{\text{当年净现金流量}}$

(5) 投资净效益率：

$$\text{投资净效益率} = \frac{\text{年净效益或年平均净效益}}{\text{全部投资}} \times 100\%$$

2. 厂址选择模式

(1) 生产接近原料产地和消费区线性模式：

设有 m 个生产地，n 个消费地和 u 个原料产地，则目标函数的最小值求解可表达为：

$$\sum_{k=1}^{u}\sum_{i=1}^{m} a_{ki}Y_{ki} + \sum_{i=1}^{m} C_i X_i + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} b_{ij} X_{ij}$$

约束条件

$$\sum_{i=1}^{m} Y_{kj} \leqslant A_k$$

$$\sum_{k=1}^{u} Y_{ki} = rX_i$$

$$\sum_{j=1}^{n} X_{ij} = X_i$$

$$\sum_{i=1}^{m} X_{ij} = B_j$$

$$(Y_{ki} \geqslant 0;\ X_i \geqslant 0;\ X_{ij} \geqslant 0)$$

式中，X_i 为第 i 生产地的产量；X_{ij} 为第 i 生产地供应给第 j 消费地的产品量；Y_{ki} 为第 k 原料产地运给第 i 生产地的原料量；A_k 为第 k 原料地的原料供应量；B_j 为第 j 消费地的需要量；r 为生产单位产品所消耗的原料量；a_{ki} 为第 k 原料地到第 i 生产地原料的单位运费；b_{ij} 为第 i 生产地到第 j 消费地产品的单位运费；C_i 为第 i 生产地单位产品的生产成本。

(2) 企业原(燃、材)料和产品运输最近便地非线性模式：

$$S = \sum_{i=1}^{n} e_i \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}$$

式中，S 为总的居民的走行耗费；e_i 为 n 个居住区相应的消费能力；$\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}$ 为居住区到商场的经济距离

求 S 的最小值，必须满足：

$$\begin{cases} \dfrac{\partial s}{\partial x}\displaystyle\sum_{i=1}^{n}\frac{e_i}{r_i}(x-x_i) = 0 \\ \dfrac{\partial s}{\partial y}\displaystyle\sum_{i=1}^{n}\frac{e_i}{r_i}(y-y_i) = 0 \end{cases}$$

(3) 第三产业的服务半径或吸引模式：

$$R \approx \sqrt[3]{\frac{b}{a}}$$

式中，R 为最大商业服务半径；a 为居民到某商业服务单位的耗费率；b 为开设该点的固定费用。

(4) 城市人口衰减模式：

$$P_0 = \int_0^X d_0 e^{-bx} \cdot 2\pi x\,\mathrm{d}x$$

式中，P_0 为城市总人口；d_0 为中心人口密度；$\mathrm{d}x$ 为边际人口密度；b 为密度梯度；x 为距中心距离。

3. 区域增长模式

(1) 新古典区域增长模式：

$$Y_i = a_i k_i + (1-a_i) l_i + t_i$$

$$k_i = \frac{s_i}{v_i} \pm \sum_j k_{ji}$$

$$l_i = n_i + \sum_j m_{ji}$$

$$k_{ji} = f(R_i - R_j)$$

$$m_{ji} = f(W_i - W_j)$$

式中，下标为区域标号；Y 为产出增长率；k 为资本增长率；l 为劳动增长率；a 为资本在收入中所占的份额；s 为储蓄/收入；v 为资本/产出；t 为技术进步增长率；m_{ji} 为每年从区域 j 向区域 i 的人口净流量除以区域 i 的人口量；k_{ji} 为每年从区域 j 向区域 i 的资本净流量除以区域 i 的资本存量；n 为人口自然增长率；W 为工资率；R 为资本回报率。

(2) 卡尔多模式：

$$t_i = t_i(y_i) \qquad (t_i' > 0)$$

$$W_i / T_i = f_i(t_i) \qquad (f_i' > 0)$$

$$y_i = y_i(W_i / T_i) \qquad (y_i' > 0)$$

$$W_i = \overline{W}$$

式中，i 为区域下标；t 为生产率增长率；$\overline{W}$ 为全国货币工资指数；y 为产出增长率。

水资源协调管理的交互式模式

朱文彬：水资源开发利用与区域经济协调管理的一种交互式模式。自然资源学报，1994，9(4)

1. 地面水系统优化管理模型

(1) 目标函数：

$$\min Z_t = W^+ P_t + W^- N_t + \sum_{i=1}^{4}\left(U_{jti}^+ P_{jti} + U_{jti}^- N_{jti}\right)$$

式中，Z_t 为第 t 个子系统总偏差量；P_t，N_t 为第 t 个子系统总供水目标的正负偏差(均为非负量)；P_{jti}，N_{jti} 为第 t 个子系统内第 j 个水库的第 i 个目标的正负偏差(均为非负量)；W^+，W^-，U_{jti}^+ 和 U_{jti}^- 均为系数；t 为子系统下标；j 为水库下标。

(2) 约束条件：

1) 水量平衡约束：

$$S_{jt} = S_{jt-1} + I_{jt} - R_{jt} - W_{jt} - G_{jt} - EV_{jt} + \sum_{k=1}^{m} A_{jk} D_{jt}$$

式中，S_{jt} 为第 t 个子系统内第 j 个水库的蓄水量；S_{jt-1} 为第 $t-1$ 个子系统内水库 j 的蓄水量；I_{jt} 为第 t 个子系统内随机流入水库 j 的水量；R_{jt} 为第 t 个子系统内水库 j 的泄放水量；W_{jt} 为第 t 个子系统内水库 j 供给城镇生活和工业用水量；G_{jt} 为第 t 个子系统内水库 j 从溢洪道排放的水量；EV_{jt} 为第 t 个子系统内水库 j 的蒸发损失水量；D_{jt} 为第 t 个子系统内水库 j 未经过发电机组而向下游泄放的水量；A_{jk} 为第 t 个子系统内水库 k 泄放水进到水库 j 时取值 1，否则 A_{jk} 取值 0；m 为系统内水库的个数。

2) 城镇生活与工业用水量的确定性目标约束：

$$\sum_{j=1}^{m} W_{jt} - P_t + N_t - PS_t = 0$$

式中，PS_t 为供水系统分配给第 t 个子系统的供水目标值。

3) 考虑到水库下游地区环境、生态等条件，下泄的最小水量确定性目标约束为：

$$D_{jt} - P_{jt1} + N_{jt1} - D_{\mathrm{TAR}\,jt} = 0$$

式中，$D_{\mathrm{TAR}\,jt}$ 为第 t 个子系统内第 j 个水库下泄水量的理想目标值。

4) 水力发电量的确定性目标约束为：

$$R_{jt} \cdot \left(a_j + b_j S_{jt-1}\right) - P_{jt2} + N_{jt2} - P_{\mathrm{TAR}jt} = 0$$

式中，$P_{\mathrm{TAR}jt}$ 为第 t 个子系统内水库 j 发电量的理想目标值；a_j，b_j 为水库 j 的发电系数，它与水头和发电机组有关。

5) 洪水控制的随机性目标约束经变换后可描述为：

$$F^{-1}\left(\alpha_{jt}\right) + S_{jt-1} - R_{jt} - W_{jt} - G_{jt} - EV_{jt} + \sum_{k=1}^{m} A_{jk} D_{kj} - P_{jt3} + N_{jt3} - FC_{jt} = 0$$

式中，$F^{-1}(\ )$ 为随机入流量 I_{jt} 分布函数 F 的反函数；α_{jt} 为第 t 个子系统内第 j 个水库的防洪能力；FC_{jt} 为第 t 个子系统内水库 j 的防洪限制水位所对应的库容。

6) 考虑到农业部门抗旱的要求，抗旱的随机性目标约束经变换后可描述为：

$$F^{-1}\left(1 - \beta_{jt}\right) + S_{jt-1} - R_{jt} - W_{jt} - G_{jt} - EV_{jt} + \sum_{k=1}^{m} A_{jk} D_{kj} - P_{jt4} + N_{jt4} - DC_{jt} = 0$$

式中，β_{jt} 为第 t 个子系统内第 j 个水库的抗旱能力；DC_{jt} 为第 t 个子系统内水库 j 为抗旱需蓄存的水量。

7) 水库 j 蓄水量的约束：

$$S_{\min j} \le S_{jt} \le S_{\max j}$$

式中，$S_{\min j}$，$S_{\max j}$ 分别为水库 j 的最小、最大蓄水量。

8) 装机容量的约束：

$$R_{jt}\left(a_j + b_j S_{jt-1}\right) \le h_{jt}\left(c_j + d_j S_{jt-1}\right)$$

式中，h_{jt} 为第 t 个子系统内第 j 个水库坝前的平均水

头；c_j，d_j 为与水库 j 的坝前水位和发电机组性能有关的发电系数

9) 下泄水量的上、下限约束：

$$D_{\min j} \leqslant D_{jt} \leqslant D_{\max j}$$

式中，$D_{\min j}$、$D_{\max j}$ 为水库 j 的最小、最大泄水量。

10) 下泄水量的算式约束：

$$R_{jt} + G_{jt} = D_{jt}$$

如果 R_{jt} 作为下泄水量时，则有如下的目标约束：

$$R_{jt} - P_{jt1} + N_{jt1} - D_{1AR\,jt} = 0$$

式中，符号意义同前

(3) 协调级模型：

据地面水系统的特点和协调算法的思想，将 PS_t 作为协调变量，π_t 作为反馈变量，构造如下的协调级模型：

$$\min Z_s = \sum_{t=1}^{N} \delta_t^n$$

$$\text{s.t.}\begin{cases} \delta_t^n \geqslant Z_t\left(PS_t^k\right) - \pi_t^k PS_t^k + \pi_t^k PS_t^{n+1} \\ \qquad (k = 1,2,\cdots,n; t = 1,2,\cdots,N) \\ \sum_{t=1}^{N} PS_t^{n+1} \geqslant M_{\text{tar}} \end{cases}$$

式中，M_{tar} 为地面水供水系统供给城镇生活和工业的目标水量；k 为迭代次数；n 为迭代总次数；N 为子系统总数；π_t^k 为子系统 t 在第 k 次迭代后的 $\sum_{j=1}^{m} W_{jt}^k$ 值。

以上所构成的二级递阶优化管理模型可作为地面水系统的管理模型。

2. 地下水系统经济管理模式

(1) 目标函数：

$$\min Z_l = \sum_{j=1}^{N_l} TC_j^l$$

式中，TC_j^l 为第 l 个子系统内第 j 个单元开采地下水资源的费用；N_l 为第 l 个子系统内包含单元的个数；l 为子系统指标；j 为单元指标。

(2) 约束条件：

1) 第 l 个子系统抽取水量约束为：

$$\sum_{k=1}^{t}\sum_{i=1}^{PN} Q^l(i,t-k+1) \geqslant R_{\min}^l(t), t \in (O,T)$$

式中，$R_{\min}^l(t)$ 为第 l 个子系统 t 时段需求的最少水量；$Q^l(i,t-k+1)$ 为第 l 个子系统 k 时段内从第 i 个井的开采水量($k \leqslant t$)；PN 为抽水井的个数；t 为开采时段数；T 为管理周期

2) 最大允许开采降深约束：

$$S_j^l(i,t) \leqslant S_{j\max}^l(i)$$

式中，i 为抽水井指标；$S_{j\max}^l(i)$ 为 l 子系统第 j 个单元内抽水井 i 上的最大允许降深

3) 降深的等式约束：

$$S(j,t) - \sum_{i=1}^{PN}\sum_{k=1}^{t} \beta(i,j,k) Q(i,t-k+1)$$

式中，$\beta(i,j,k)$ 为第 k 个开采时段末由于节点 i 抽取单位水量引起 j 出的降深响应，即代数技术函数。

4) 抽水井的抽水能力约束：

$$Q^l(i,t-k+1) \leqslant Q_{\max}^l(i)$$

式中，$Q_{\max}^l(i)$ 为第 i 个子系统第 i 个井的最大可能出水量。

5) 考虑到含水层上覆土壤的合理利用，含水层中最高水位的限制条件为：

$$S_j^l(i,t) \geqslant S_{j\min}^l(i) \qquad (t \in (O,T))$$

式中，$S_{j\min}^l(i)$ 为第 l 个子系统第 j 个单元内抽水井 i 上的必须降深值(此时井是排水)。

(3) 协调级模型：

地下水资源系统协调级的目标函数是使整个系统的总降深之和最小化，即：

$$\min Z_G = \sum_{l=1}^{L}\sum_{j=1}^{PN}\sum_{t=1}^{T} S(l,j,t)$$

约束条件是地下水供水系统应满足整个系统对地下水资源的最少需求量，即：

$$\sum_{l=1}^{L} W_l^g(t) \geqslant W_{\min}^g(t) \qquad t \in (O,T)$$

式中，$W_l^g(t)$ 为第 l 个子系统 t 时段内地下水资源的开采量；$W_{\min}^g(t)$ 为 t 时段内用水系统对地下水资源的最少需求量。

上面所建立的二级递阶优化管理模型就作为地下水资源系统经济管理的模式。

3. 区域经济系统管理模式

(1) 目标函数：

$$\min Z_i = p_1(d_{i1}^+ + d_{i1}^-) + p_2(d_{i2}^+ + d_{i2}^-) + p_3(d_{i3}^+ + d_{i3}^-) + p_4(w_{i4}d_{i4}^+ + w_{i5}d_{i5}^-) + p_5\left(\sum_{t=1}^{T} w_{it}d_{it}^-\right)$$

式中，$p_1, p_2, \cdots, p_5$ 分别为可供水资源目标、粮食生产目标、生活用水目标、农业总产值目标、工业总产值目标的优先权，按相对重要性划分。w_{it} 为权重系数；d_{i1}^+、d_{i1}^-，…，d_{i5}^+、d_{i5}^- 为第 i 个子系统与各目标的偏差；d_{it}^- 为第 i 个子系统在 t 时段内与目标的负偏差，也就是实际达到值与预期值之间的负偏差；T 为管理周期。

(2) 约束条件：

1) 可供水资源的目标约束：

$$\sum_{j=1}^{16}(A_{ij} + B_{ij})x_{ij} + d_{i1}^- - d_{i1}^+ = CR_i + CQ_i$$

2) 粮食产量的目标约束：

$$X_{i1} + d_{i2}^- - d_{i2}^+ = D_{i1}$$

3) 生活用水的目标约束：

$$\frac{1}{\rho_{i15}}X_{i15} + d_{i3}^- - d_{i3}^+ = D_{i15}$$

4) 农业总产值的目标约束：

$$\sum_{j=1}^{2}\rho_{ij}x_{ij} - \sum_{j=3}^{6}x_{ij} + d_{i4}^- - d_{i4}^+ = AG_i$$

5) 工业总产值的目标约束：

$$\sum_{j=7}^{14}x_{ij} + d_{i5}^- - d_{i5}^+ = IN_i$$

6) 其他部门的产值目标约束：

$$x_{ij} - d_{it}^- - d_{it}^+ = D_{ij}$$

$$(j \neq 1,15; t = 1,2,\cdots,T)$$

7) 资金及其他资源的约束：

$$\sum_j g_{ijk} \cdot X_{ij} \leqslant CM_{ik} + CG_{ik}$$

$$(k = 1,2,\cdots,NR)$$

8) 交通、输水能力等约束可用下式描述：

$$X_{ij} \in R_{xi}$$

9) 非负约束为：

$$X_{ij} \geqslant 0, \quad (i = 1,2,\cdots,M; \quad j = 1,2,\cdots,16)$$

式中，X_{ij} 中 $j = 1,2,\cdots,16$ 分别表示粮食作物、经济作物、林业、畜牧业、副业、渔业、煤炭、电力、冶金、建材、机械、化工、轻纺、其他工业、生活、其他用水；A_{ij}，B_{ij} 分别为第 i 个子系统第 j 用水部门生产单位产品消耗公用、本子系统水资源的数量；CR_i 为系统的公用水资源预分配给第 i 个子系统的数量；CQ_i 为第 i 个子系统的可用水资源量；D_{ij} 为第 i 个子系统第 j 用水部门产值(用水量、产量等)的目标值；IN_i 为第 i 个子系统工业总产值的目标值；AG_i 为第 i 个子系统农业总产值的目标值；ρ_{ij} 为第 i 个子系统内粮食作物、经济作物及生活供水的价格；g_{ijk} 为第 i 个子系统第 j 用水部门生产单位产品需要第 k 种资源的数量；CM_{ik}，CG_{ik} 分别为第 i 个子系统内第 k 种资源的可供给量和整个系统第 k 种公共资源预分配给第 i 个子系统的数量；NR 为资源种类指标。R_{xi} 为第 i 个子系统内其他约束组成的集合。

(3) 协调级模型：

区域经济系统中选用经济效益最大作为目标函数是很适当的，可用下式描述：

$$\max Z_E = \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{16}BC_{ij}x_{ij}$$

约束条件为：

$$\sum_{i=1}^{M}CR_i \leqslant CR$$

$$\sum_{i=1}^{M}CG_{ik} \leqslant G_k$$

$$(k = 1,2,\cdots,NR)$$

式中，BC_{ij} 为第 i 个子系统用水部门 j 的效益系数；CR 为整个系统的公用水资源量；G_k 为整个系统第 k 种资源的数量。

以上所构造的二级递阶优化模型可作为区域经济系统的管理模式。

4. 水资源开发利用与区域经济协调管理模式的总协调级模型

总协调级模型以整个水资源系统与区域经济系统

所能获得的总经济效益极大化作为目标函数，用下式表示：

$$\max Z_r=\sum_{t=1}^{T}BT(t)-\left[\sum_{t=1}^{T}(SC(t)+GC(t))\right]$$

约束条件是使需水与供水之差小于 ε，即：

$$\left|W_t^{\mathrm{SUP}}-W_t^{\mathrm{USE}}\right|\leqslant\varepsilon,\qquad (t=1,2,\cdots,T)$$

式中，$BT(t)$ 为区域经济系统在 t 时段内所获得的净效益；$SC(t)$，$GC(t)$ 分别为地面水、地下水的供水费用；W_t^{SUP}、W_t^{USE} 分别为 t 时段内的可供水量与需水量；t 为时段指标；ε 为供水量与蓄水量之间的偏差系数。

地区自然资源优势比较模型

王礼茂，概建华，沈镭：地区自然资源优势的比较——以山东、湖北、四川为例　自然资源，1994，5

（1）自然资源的组合指数模型：

$$S=\sum_{i=1}^{m}(x_i-\bar{x})^2/m$$

式中，S 为自然资源组合指数；m 为资源种类数；x_i 为第 i 项资源占全国的比重；$\bar{x}$ 为各项资源占全国比重的平均值

（2）自然资源人均拥有量综合指数 R 模型：

$$R=\sqrt[m]{\sum_{i=1}^{m}\frac{Y_i}{T_i}}$$

式中，m 为资源种类数；Y_i 为第 i 项资源某省人均拥有量；T_i 为第 i 项资源全国人均拥有量

模糊 ISODATA 迭代计算方法

李新运，张海峰，余锦：山东省区域经济发展梯度分析及战略构想　地理研究，1995，14(1)

（1）给定迭代误差限 $e>0$，迭代次数初始值 $r=0$，指数 $t\geqslant1$ 和初始化分矩阵为 $(u_{ki})_{s\times m}$，划分矩阵应满足 $\sum_{k=1}^{s}u_{ki}=1$ 和 $\sum_{i=1}^{m}u_{ki}>0$。

（2）计算聚类中心：

$$v_{kj}^{(r)}=\frac{\sum_{i=1}^{m}(u_{ki})^t x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}(u_{ki})^t}\qquad\begin{matrix}(k=1,2,\cdots,s)\\(j=1,2,\cdots,n)\end{matrix}$$

（3）计算第 $r+1$ 次迭代的划分矩阵：

$$u_{ki}^{(r+1)}=\frac{1}{\sum_{l=1}^{s}\left[\sum_{j=1}^{n}\left(x_{ij}-v_{kj}^{(r)}\right)\Big/\sum_{j=1}^{n}\left(x_{ij}-v_{lj}^{(r)}\right)\right]^{\frac{1}{t-1}}}$$

（4）若 $\max_{k,i}\left|u_{ki}^{(r+1)}-u_{ki}^{(r)}\right|<e$，则停止迭代，转向(5)；否则转向(2)继续迭代

（5）$v_{kj}^{(r+1)}$、$u_{ki}^{(r+1)}$ 就是欲求的各类别的聚类中心和划分矩阵。若 $u_{k_0i}=\max_{k}u_{ki}$，则第 i 个样本属于第 k_0 类，$i=1,2,\cdots,m$。

区域系统分析的逻辑斯谛方程

张志强：区域 PRED 的系统分析与决策制定方法　地理研究，1995，14(4)

$$\frac{dN}{dt}=RN=r\left(1-\frac{N}{K}\right)$$

$$N=\frac{K}{1+ce^{-rt}}$$

式中，$C=\dfrac{K-N_0}{N_0}$；r 为人口的内禀自然增长率；N 为人口数；N_0 为时间 t_0 时刻的人数；K 为环境的限制容量；t 为时间。

人口预测模型

臻惠新：晋陕蒙接壤区人口发展与劳动力资源转移的分析　自然资源，1995，5

$$P_X=P_0(1+12‰)^X$$
$$P_t/P_0=1+(B-D+I-E)/P_0$$

式中，P_X 为人口未来发展规模；P_0 为基期人口数；X 为预测年份；P_t 为预测期人口数；B 为 $0\sim t$ 时内出生人数；D 为该时期死亡数；I，E 为同期迁入、迁出人数

区域差异合理值计算公式

黄朝永：省域差异的警戒水平及调控研究——以山东省为例　地理研究，1996，15(2)

$$a_0=K\frac{SV}{L}\qquad a\in[x_1,x_2]$$

式中，a_0 为差异合理值；K 为差异系数；S 为区域面积；L 为发展水平；V 为发展速度；x_1 为区域发展启动差异值；x_2 为区域经济系统崩溃临界差异值

不平衡指数计算公式

焦华富：中国外商直接投资的地域结构研究．地理研究，1997，16(3)

$$I=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{\sqrt{2}}{2}(Y_i-X_i)\right]^2}{n}}$$

式中，I 为不平衡指数；Y_i 为各地域单元投资额占全国投资总额的百分比；X_i 为各地单元参照变量占全国的百分比；n 为地域单元的个数。

洪泛平原农村居民地空间分布特征模型

徐血仁，万庆：洪泛平原农村居民地空间分布特征定量研究应用探讨．地理研究，1997，16(3)

1．居民地空间分布规模的估算方法

(1) 居住用地人口密度法：

$$P_i=DS_i$$

式中，P_i 为自然村人口数；S_i 为自然村占地面积；D 为居住用地平均人口密度。

(2) 利用回归公式估算：

$$Y=\beta_0+\beta_1X$$

式中，Y 为自然村人口数；X 为自然村占地面积；β_0，β_1 为参数。

2．居民地空间分布特征参数的计算公式

(1) 居民地空间分布密度计算公式：

$$DG_ih_j=NG_ih_j/S$$

式中，DG_ih_j 为区域各高程带内不同等级居民地的平均密度；NG_ih_j 为 h_j 高程带内 G_i 级居民地数量；S 为区域面积。

(2) 人口空间分布密度计算公式：

$$DPh_j=\sum_{ij=1}^{n}PG_ih_j/S$$

式中，DPh_j 为区域人口空间分布密度；$PG_ih_j=NG_ih_j\times\overline{P}G_i$，$PG_ih_j$ 为 h_j 高程带内 G_i 级居民地人口数量，$\overline{P}G_i$ 为 G_i 级居民地人口平均规模；n 为居民地等级；S 为区域面积。

3．淹没区居民地、人口数量的估算公式

(1) 淹没区居民地数量计算公式：

$$NG_i=\sum_{ij=1}^{n}S\times DG_ih_j$$

式中，NG_i 为淹没区居民地数量；n 为高程带数量；S 为淹没区面积；h_j 为淹没区高程范围。

(2) 淹没区人口总数计算公式：

$$P_{fa}=\sum_{i=1}^{n}NG_i\times\overline{P}G_i$$

式中，P_{fa} 为淹没区人口总数；n 为居民地等级数；NG_i 为 G_i 级居民地数量；$\overline{P}G_i$ 为 G_i 级居民地人口平均规模。

4．淹没区房屋数量的估算公式

$$R_{fa}=P_{fa}\times AR$$

式中，R_{fa} 为淹没区房屋数量；AR 为人均住房数量；P_{fa} 为淹没区估算人口数量。

区域国土资源评价的系统分析模型

靖学青：区域国土资源评价的系统分析方法．自然资源学报，1997，12(4)

(1) 自然资源要素的系统综合指标：

1) 自然资源综合优势度：

$$Z=\frac{mn-\sum_{j=1}^{m}d_{ij}}{mn-n}$$

式中，Z 表示自然资源综合优势度，Z 值越大，则优势越大，所处的地位越重要；m 表示较大区域系统所属的同级比较地区数；n 表示自然资源种类数；$\sum_{j=1}^{m}d_{ij}$ 表示各种自然资源量在统计比较地区中的位次和。

各种自然资源要素数量(或指数)及其位次可由下面方法计算并排序获得。

矿产资源可由矿产资源潜在价值量 S 将种种矿产资源综合为一个指标：

$$S=\sum_{i=1}^{m}W_iR_iV_i\qquad(i=1,2,3,\cdots,m)$$

式中，W 表示矿产储量，可以是保有储量，也可以是工业储量；R 表示矿产采选回收率；V 表示矿产价格。

土地资源加权平均综合指数 C 综合指标：

$$C=\sum_{i=1}^{4}f_ix_i\qquad(i=1,2,3,\cdots,m)$$

式中，x 表示各种土地资源粮占较大区域系统土地资源量的比重；f 表示各种土地资源的附加权数，按其经济效益大小程度而定。

2) 自然资源人均拥有量综合指数：

$$Y_1 = \sqrt[4]{x_1 x_2 x_3 x_4}$$

式中，Y_1 表示自然资源人均拥有量综合指数；x_1、x_2、x_3 和 x_4 分别表示上述 4 种自然资源人均拥有量指数。其算法是：由上面方法得到各种自然资源的基础上，求出区域每一类自然资源人均拥有量，然后以较大区域系统这四然资源的人均拥有量为 100，就可以用区域自然资源人均量与较大区域资源人均量的比求出每类自然资源的人均量指数。

自然资源的组合状况可用“组合指数”表示，用“标准差”计算：

$$T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}(x_i - \bar{x})^2}{n}} \qquad (i = 1,2,3,\cdots,m)$$

式中，T 为标准差；x_i 代表各种自然资源要素：一次能源、水、土地、矿产资源储量占较大区域系统各种相应自然资源总量的比重；$\bar{x}$ 为区域各种自然资源量比重的算术平均值。

总起来讲，一个区域自然资源的整体优劣势 E 同各类自然资源的综合指数 Y_1 成正比，同各类自然资源的组合指数 T 成反比，即 $E = \frac{Y_1}{T}$。

(2) 经济资源要素的系统组合指标：

基础指标有 5 个，分别代表 5 个方面的经济要素：①经济总规模；②资产存量；③资金供给能力；④技术水平；⑤工业化水平，以工业化结构比重数 F 表示：

$$F = \sqrt{\frac{g}{G}\frac{h}{H}}$$

式中，g，G 分别表示区域工业总产值和社会总产值，h、H 分别表示区域工业劳动者和社会劳动者人数。

经济资源综合指数 Y_2 为：

$$Y_2 = \sqrt[5]{x_1 x_2 x_3 x_4 x_5}$$

式中，x_1，x_2，x_3，x_4 和 x_5 分别表示上述 5 个基础指标的标准化指数，即以较大区域基础指标为 100，各所属区域相应指标的指数。

(3) 社会资源要素的系统综合指标：

基础指标有 4 个，分别代表 4 个方面的社会资源要素：①劳动力资源；②人口文化素质水平；③居民生活质量；④城镇化水平 AB，$AB = \sqrt{\frac{A_1}{A}\frac{B_1}{B}}$，$A$，$A_1$ 分别代表区域城镇市区非农业人口数和区域总人口，B，B_1 分别表示城镇工业产值和区域工业总产值。因此，社会资源综合指数可表示为：

$$Y_3 = \sqrt[4]{x_1 x_2 x_3 x_4}$$

式中，x_1，x_2，x_3 和 x_4 分别表示上述 4 个基础指标的标准化指数。

(4) 区域资源综合力：

在上述国土资源的三大组成要素：自然资源、经济资源、社会资源的综合指数计算出来后，可以用算术平均数 $V = \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3} Y_i$，或用加权平均数 $V = \sum_{i=1}^{3} f Y_i$ 来综合，通过横向比较就可以衡量出区域国土资源综合力。

耕地生产潜力修正模型

王万茂，黄贤金：中国大陆农地价格区划和农地估价．自然资源，1997，4

(1) 耕地生产潜力的修正系数 M_i 模型：

$$M_i = \sqrt[9]{T_{i1} T_{i2} \cdots T_{i9}}$$

$$T_{ij} = \frac{F_{ij}}{Q_j}$$

式中，T_{ij} 为第 i 区第 j 种要素的当量值；F_{ij} 为第 i 区第 i 种要素的要素值；Q_j 为大陆第 j 种要素的平均值；$i = 1,2,\cdots,30$；$j = 1,2,\cdots,9$。

(2) 综合修正系数的隶属度函数 $\mu_{A(x)}$ 模型：

$$\mu_{A(x)} = \begin{cases} 1.2 & (x > 1.7) \\ 0.39x + 0.53 & (0.7 < x \leqslant 1.7) \\ 0.8 & (x \leqslant 0.7) \end{cases}$$

区域土地生产潜力 Y 模型

戴进，聂庆华：陕北黄土高原土地生产力与人口适宜容量研究．自然资源，1997，6

$$Y = \sum_{i=1}^{n} Y_i S_i$$

$$Y_i = Y_0 f(T) f(w) f(s) f(d)$$

式中，Y_0 为光能生产潜力；$f(T)$ 为温度效应系数；$f(w)$ 为水分效应系数；$f(s)$ 为土壤肥力效应系数；$f(d)$ 为灾害效应系数；S_i 表示区域土地面积。

Logistic 曲线方程

吕鸣伦，刘卫国：区域可持续发展的理论探讨．地理研究，1998，17(2)

(1) 微分形式：

$$\mathrm{d}N/\mathrm{d}t = rN[(K-N)/K]$$

式中，N 为区域综合发展水平；r 为区域发展的内禀增长率；K 为区域发展的环境限制容量；t 为时间。

(2) 积分形式：

$$N = K/(1+ce^{-rt})$$

式中，$c=(K-N_0/N_0)$ 为常数，N_0 为 t_0 时刻的区域发展综合水平。

区域人地相互作用的综合潜力模型

秦耀辰，徐铭杰：区域持续发展的指标研究．地理学报，1998，53(2)

$$R_{\mathrm{MLP}} = a(r,t)f(N,S,E,d)$$

式中，R_{MLP} 为区域人地相互作用的综合潜力；$a(r,t)$ 为特定的区域空间 (r) 和时段 (t) 所决定的潜力订正系数；N 为自然资源的承载力；S 为社会资源的潜在能力；E 为环境的社会经济容量；d 为其他项。

社会需求分析的 Working 模型

钟颖杰，王铮：中国八个地区的消费需求分析．地理学报，1998，53(4)

$$p_i q_i / M = \alpha_i + \beta_i \lg M \qquad (i=1,\cdots,n)$$

式中，p_i 和 q_i 分别为第 i 种消费品的价格和需求量；M 为居民总消费支出；α_i 和 β_i 为参数。

外商直接投资的区域分异模型

贺灿飞，梁进社：中国外商直接投资的区域分异及其变化．地理学报，1999，54(3)

(1) 外商直接投资规模的基本模型：

$$\ln Y = E_0 + E\ln X$$

式中，Y 为 FDI 的规模；X 为投资区位因素变量；E 为弹性系数。

(2) 综合优势系数：

$$\sigma_i = \sum X_{ij}E_j$$

式中，σ_i 为综合优势系数；X_{ij} 为 i 区第 j 个投资区位因素；E_j 为第 j 个投资区位因素的弹性系数。

区域规划模型

方创琳，毛汉英：区域发展规划指标体系建立方法探讨．地理学报，1999，54(5)

(1) 熵技术支持下规划指标权系数赋值的层次分析法：

$$\lambda_i = \frac{\mu_i w_i}{\sum_{j=1}^{n}\mu_j w_j}$$

$$\mu_i = \frac{d_i}{\sum_{j=1}^{n} d_j}$$

$$d_j = 1 - E_j$$

$$E_j = -\frac{\sum_{i=1}^{n} r_{ij}\ln r_{ij}}{\ln n}$$

式中，r_{ij} 为归一化判断矩阵的元素；w_j 为由 AHP 法得出的规划指标权系数；λ_i 为修正后的指标权系数。

(2) 专家群民主决策支持下定性指标定量转化的赋权方法：

$$w_i = \frac{\sum_{i=1}^{m}\ln h_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\ln h_{ij}}$$

式中，$h_{ij} = m + q - f_{ij}$，m 为规划指标个数；q 为避免某个指标可能排在最后导致权重为零而设置的一个参数；f_{ij} 为第 j 为专家对第 i 个指标就重要性所给出的优先序号。

(3) 多层次多目标模糊综合测度模型：

$$E = \underset{\sim}{A}(i)\cdot \underset{\sim}{R}(i) = (e_1,\ e_2,\ \cdots,\ e_m)$$

式中，E 为最终综合测度集；$\underset{\sim}{A}(i)$ 为测度指标的权系数向量；$\underset{\sim}{R}(i)$ 为测度隶属度矩阵；e_j $(j=1,2,\cdots,m)$ 为区域发展水平的高低状况。

外商投资与沿海地区经济增长的定量分析模型

李小建：外商直接投资对中国沿海地区经济发展的影响．地理学报，1999，54(5)

$$G = a + b_1L + b_2RT + b_3C_{\mathrm{fi}} + b_4C_{\mathrm{fi-1}} + b_5C_{\mathrm{di}} + b_6C_{\mathrm{di-1}} + b_7X$$

式中，G 为国内生产总值(GDP)年增长率；L 为劳动力因素(从业人员年变化率)；RT 为资源转换因素(第二、三产业增加值在 GDP 中的比重)；C_{fi} 为外国投资变量(实际利用外资占 GDP 的比重)；C_{fi-1} 为滞后一年的外国投资变量；C_{di} 为国内投资变量(扣除外资的全社会固定资产投资总额占 GDP 的比重)；C_{di-1} 为滞后一年的国内投资变量；X 为出口变量(出口额占 GDP 的比重)；a 和 b_i (i=1,2, …,7)为统计系数。

水资源可持续发展利用规划的耦合模型

蒋业放，梁季阳：水资源可持续发展利用规划耦合模型与应用．地理研究，2000，19(1)

$$\max\left[E(\boldsymbol{X}),S(\boldsymbol{X})-R(\boldsymbol{X})\right]$$

$$G(\boldsymbol{X})<0$$

$$x_i \geqslant 0 \qquad (i=1,2,\cdots,n)$$

式中，$\boldsymbol{X}$ 为 n 维决策向量；E、S、R 分别为经济效益、社会效益和环境效益；G 为约束条件集，表示水资源承载力、环境容量、土地资源、其他社会约束和子系统状态方程。

水资源可持续利用的多目标线性规划模型

蒋业放，梁季阳：水资源可持续发展利用规划耦合模型与应用．地理研究，2000，19(1)

(1) 目标函数：

$$\text{GDP}=\max\sum_{t=1}^{15}\sum_{i=1}^{10}\tau_{it}x_{it}$$

$$\text{COD}=\min\sum_{t=1}^{15}\left(\sum_{i=2}^{10}\gamma_{it}x_{it}+L_{\text{COD}t}\right)$$

式中，GDP 为国内生产总值；COD 为工业和生活污水化学耗氧量；x_{it} 为 i 行业 t 时段末产值；τ_{it} 为增加值系数；γ_{it} 为单位产值 COD 排放量；$L_{\text{COD}t}$ 为生活污水 COD 总量。

(2) 约束条件：

投入产出约束：

$$(I-A)X=Y$$

年度扩大再生产约束：

$$x_{it}=\theta_{it}k_{it}$$

$$k_{it}=(1-\delta_{it})k_{i,t-1}+\Delta k_{it}$$

$$\Delta k_{it}=\beta_{it}I_{it}+\beta_{it}I_{it}+\beta_{it}I_{it}+\cdots;\forall i,t$$

$$I_t=\sigma_t\sum_{i=1}^{10}x_{i,t-1}+H_t;\forall t$$

式中，x_{it} 为 i 行业 t 年末产值；θ_{it} 为资本产出率；k_{it} 为年初固定资产；δ 为折旧率；Δk_{it} 为固定资产增量；β 为各年投资形成当年固定资产的比率；I 为投资；σ 为累积率；H 为外来投资

(3) 工业与城镇生活供水需水约束：

$$\sum_{i=2}^{10}\alpha_{it}x_{it}+0.365\eta_t PC_t \leqslant SPG_t+KARST_t+ADD_t;\quad \forall t$$

式中，t 为时段；SPG_t 为泉水提水工程可供水量；$KARST_t$ 为岩溶水设计开采量；ADD_t 为除上述两项外的水源可供水量；α_{it} 为万元产值取水量；x_{it} 为 i 行业产值；η_t 为人均用水定额；PC_t 为城镇人口。

(4) 工业经济与水平衡约束方程：

$$x_{1t}=\sum_{i=1}^{4}\left\{a\omega_{it}\left[\sum_{j=1}^{4}(p\omega_{jt}up\omega_{jt}-p_{jt}up_{jt})\right]+t\alpha_{it}\sum_{j=1}^{4}p_{jt}up_{jt}+FHF_i\right\};\quad \forall t$$

$$a\omega_{it}\sum_{j=1}^{4}p\omega_{jt}\beta_{jt}+FHF_{it}\beta_{ft}\leqslant RSV_{it}+DVS_{it}+EL_{it}+WW_{it}+GW_{it};\quad \forall i,t$$

式中，x_{1t} 为全县农业总产值；i 为分区号、j 为作物种类；t 为时段序号；$a\omega_{it}$ 为水浇地面积；$p\omega_{jt}$ 和 p_{jt} 分别为水浇地和旱地 j 类作物种植面积；$up\omega_{jt}$ 和 up_{jt} 分别为水浇地和旱地 j 类作物单产；$t\alpha_{it}$ 为 i 区耕地总面积；FHF_i 为 i 区林牧渔业产值；β_{jt} 为 j 类作物灌溉定额；β_{ft} 为林牧渔业单位产值用水定额；RSV_{it} 为水库供水量；DVS_{it} 为旱井可供水量；EL_{it} 为提水量；WW_{it} 为污水可利用量；GW_{it} 为地下水可供应量。

(5) COD 排放量与产值上下界约束：

$$\sum_{i=2}^{10}\gamma_{it}x_{it}+L_{CODT}\leqslant CODUP_t;\forall t$$

$$X_{\text{LOW}it}\leqslant x_{it}\leqslant X_{\text{UP}it};\quad \forall i,t$$

式中，C_{ODUP_t} 为 COD 上限；$X_{\text{UP}it}$ 和 $X_{\text{LOW}it}$ 分别为 i 行业产值上界和下界。

成本及效益模型

刘贵利：城乡结合部建设用地适宜性评价初探．地理研究，2000，19(1)

(1) 成本模型：

$$C = F(X)$$

式中，C 为成本；F 为特性参数。

(2) 效益模型：

$$E = G(X)$$

式中，E 为效益；X 为土地利用形式(工业、商业、住宅)。

可持续发展代际公平模型

杨勤业，张军涛，李春晖：可持续发展代际公平的初步研究．地理研究，2000，19(2)

(1) 代际环境冲突公平判断模型：

$$\frac{E_{n+1}}{f(n+1)} = \frac{E_n}{f(n)}$$

$$f(t) = F\left[d_{(1)}, d_{(2)}, \cdots, d_{(m)}\right]$$

式中，E_{n+1}、E_n 分别为第 $n-1$ 代人和第 n 代人的环境存量；$f(n+1)$、$f(n)$ 分别为第 $n+1$ 代人和第 n 代人环境偏好率；$f(t)$ 为描述第 t 代人环境偏好的一个多变量函数，由分别代表人均 GDP、科技发展水平、环境管理水平等的 $d_{(1)}, d_{(2)}, \cdots, d_{(m)}$ 变量组成；m 为 $f(t)$ 的因子个数。

(2) 协调度计算公式：

$$H = \left(a\sum_{i=1}^{n}\cos\frac{\pi}{2}\frac{M_i}{M_{i0}} + b\right) \times \left(\sum_{j=1}^{l}\frac{G/m_j}{G_0/m_{j0}}e^{\frac{G/N}{G_0/N_0}} - e\sum_{k=1}^{m}\lambda_k\frac{\rho_k}{\rho_{k0}}\right)$$

式中，G_0，G 分别为参考年与当年的国内生产总值；N_0，N 分别为参考年与当年某区域的人口；M_0，M 分别为某种资源的储存与开采量；m_j 为某种资源的当年消耗量；ρ_0，ρ 分别为某种污染物的允许浓度与当年实际浓度；a、b、λ 为权系数，$a+b=1$。

最低水循环成本计算方法

宗跃光，陈红春，郭瑞华等：地域生态系统服务功能的价值结构分析——以宁夏灵武市为例．地理研究，2000，19(2)

(1) 农业水循环价值公式：

$$V_a = -a \cdot (W_1 - W_2) \cdot P_w \quad S_a$$

式中，V_a 为农业水循环价值；W_1 为农业年总用水量；W_2 为农业年总排水量；P_w 为当地农业水资源价格；S_a 为农业用地面积；a 为调整系数。

(2) 城镇水循环价值公式：

$$V_c = -W \cdot P \cdot P_w / S_c$$

式中，V_c 为城镇水循环价值；W 为人均用水量；P 为总人口；P_w 为当地生活水资源价格；S_c 为城镇用地面积。

(3) 工矿水循环价值公式：

$$V_i = -W \cdot G \cdot P_w / S_i$$

式中，V_i 为工矿水循环价值；W 为万元产值用水量；G 为工矿业总产值；P_w 为当地工业水资源价格；S_i 为工矿用地面积。

环境污染计算方法

宗跃光，陈红春，郭瑞华等：地域生态系统服务功能的价值结构分析——以宁夏灵武市为例．地理研究，2000，19(2)

(1) 城镇水污染价值公式：

$$V_{cw} = -W \cdot P \cdot P_w / S_c$$

式中，V_{cw} 为城镇水污染负价值；W 为人均生活废水量；P 为总人口；P_w 为当地生活废水处理价格；S_c 为城镇用地面积。

(2) 城镇的大气污染形成的价值公式：

$$V_{ca} = -A \cdot P \cdot P_a / S_c$$

式中，V_{ca} 为城镇大气污染负价值；A 为人均生活废气量；P 为总人口；P_a 为当地废气处理价格；S_c 为城镇用地面积。

(3) 城镇废渣污染形成价值公式：

$$V_{cs} = -S \cdot P \cdot P_s / S_c$$

式中，V_{cs} 为城镇废渣污染负价值；S 为人均生活废渣量；P 为总人口；P_s 为当地生活废渣处理价格；S_c 为城镇用地面积。

(4) 城镇污染总价值公式：

$$V_c = V_{cw} + V_{ca} + V_{cs}$$

(5) 工矿水污染价值公式：

$$V_{iw} = -W \cdot G \cdot P_w / S_i$$

式中，V_{iw} 为工矿水污染负价值；W 为万元产值工业废水量；G 为总产值；P_w 为当地工矿废水处理价格；S_i 为工矿用地面积

(6) 工矿大气污染价值公式：

$$V_{ia} = -A \cdot P \cdot P_a / S_i$$

式中，V_{ia} 为工矿大气污染负价值；A 为人均生活废气量；P 为总人口；P_a 为当地废气处理价格。

(7) 工矿废渣污染价值公式

$$V_{cs} = -S \cdot P \cdot P_s / S_i$$

式中，V_{cs} 为城镇废渣污染负价值；S 为人均生活废渣量；P 为总人口；P_s 为当地生活废渣处理价格；S_i 为城镇用地面积。

(8) 工矿污染总价值公式：

$$V_i - V_{iw} + V_{ia} + V_{is}$$

(9) 运输污染测算采用系数法：

$$V_t = a \cdot P_i \cdot V_i$$

式中，a 为换算系数；P_i 为吨公里单价；V_i 为万吨公里。

单位面积社会资本的测算公式

宋跃光，陈红春，郭瑞华等：地域生态系统服务功能的价值结构分析——以宁夏灵武市为例．地理研究，2000，19(2)

(1) 土地价值计算公式：

$$V = a/(R + r)$$

式中，a 为纯收益；V 为当地居住用地平均价值；r 为还原利率；R 为风险调整系数。

(2) 就业资本计算公式：

$$V_i = T_i / S_i$$

或

$$V_i = P_i \cdot J_i / S_i$$

式中，V_i 为第 i 项产业就业资本；T_i 为第 i 项产业就业工资总额；P_i 为第 i 项产业就业人数；为第 i 项产业就业人均工资总额；S_i 为第 i 项产业面积。

(3) 文教资本计算公式：

$$V = (E_1 + E_2 + E_3) / S_c$$

式中，E_1 为中小学和幼儿园学生教育经费；E_2 为教育行业教职工工资；E_3 为科研技术人员工资；S_c 为城镇用地。

(4) 医疗资本计算公式：

$$V = (M_1 + M_2) / S_c$$

式中，M_1 为医院经营收入；M_2 为医疗人员工资总额。

(5) 行政资本计算公式：

$$V = M / S_c$$

式中，M 为行政机关工资总额。

区域可持续发展水平及空间分布特征模型

廖志杰，刘岳：中国区域可持续发展水平及空间分布特征．地理学报，2000，55(2)

(1) 区域 PRED 系统人口演化数学模型：

$$\frac{dX}{dt} = rX\left(1 - \frac{X}{M}\right) + N$$

式中，非线性函数 $rX(1 - X/M)$ 为反应项；N 为扩散项，即人口吸引力；dX 是在很短的时间段 dt 内变量 X 的变化。

(2) 区域对人口的吸引力模型：

$$F = (X_i^2 - X_j^2)\exp(-bd_{ij})$$

式中，X_i 和 X_j 分别表示 i，j 两地的吸引力机制；d_{ij} 为 i，j 两地间的距离；b 为对迁移距离的敏感性常数。

自然资源消费需求生命周期规律

刘燕鹏，李立贤：中国双向式自然资源发展战略研究．自然资源学报，2000，15(3)

(1) 矿产资源：

$$Lut = D_t / Y_t$$

式中，Lut 为矿产资源消费强度；D_t 为单位 GDP 的矿产资源的消耗量；Y_t 为人均 GDP；t 为时间。

(2) 耕地资源：

我国国民经济各产品部门对耕地资源的完全消耗系数的计算模型：

$$\overline{H} = S(I - A - \alpha D)^{-1}$$

式中，$\overline{H}$ 为在固定资产消耗情况下各部门完全占用系数矩阵；S 为直接占用系数矩阵，$S = \{S_{ij}\}$；I 为单位矩阵；A 为直接消耗系数矩阵；α 为固定资产折旧率对角矩阵；D 为固定资产直接占用系数矩阵。

经济全球化分析方法及指标计算

李小建，张晓平，彭宝玉：经济全球化对中国区域经济发展的影响. 地理研究，2000，19(3)

(1) 全球化指数：

$$G_i=(T_i+F_i)/2 \qquad (i=1,2,\cdots,n)$$

式中，G_i 为全球化指数；T_i 为外贸指标，取区域年度进出口总额占 GDP 的比值；F_i 为外资指标，取区域年度实际利用外资额占全社会固定资产投资的比值；i 为区域。

(2) 回归分析方法：

$$I=a+bG$$

式中，I 为区域经济发展水平指标；G 为相应区域的全球化指数；a、b 为系数，$b=b_0+b_1M$，M 为区域工业发展水平指标，b_0，b_1 为系数。

坎德尔秩次相关检验法

热米提·依米提，塔西甫拉提·特依拜等：内流河域水资源利用对径流年际内变化影响的分析——以塔里木河流域为例. 地理研究，2000(3)

$$U=\frac{\tau}{[\mathrm{Var}(\tau)]^{1/2}}$$

式中，U 为统计量；$\tau=\frac{4\sum P_i}{n(n-1)}-1$；$\mathrm{Var}(\tau)=\frac{2(2n+5)}{9n(n-1)}$；$P_i$ 为所有观测值 $P(x_i,x_j;j>i)$ 中的 $x_i<x_j$ 出现个数；n 为观测值个数。

水资源财富代际转移模型

白军红，余国营：中国水资源可持续开发利用模型及对策. 水土保持通报，2000，20(3)

$$S_1=S_0-C_1+S_0R_1$$

$$S_2=S_1-C_2+S_1R_2$$

$$\vdots$$

$$S_{n-1}=S_{n-2}-C_{n-1}+S_{n-2}R_{n-1}$$

$$S_n=S_{n-1}-C_n+S_{n-1}R_n$$

式中，S_n 为第 n 代的水资源存量；C_n 为每代水资源的开发量；R_n 为水资源的再生速率。

黄土高原地区可持续发展评价模型

崔灵周，曹明明，李占斌等：黄土高原地区可持续发展指标体系与评价方法设计. 水土保持通报，2000，20(3)

(1) 可持续发展水平 F 模型：

$$F=\sum_{i=1}^{k}g_iy_i$$

$$y_i=\sum_{i=1}^{p}l_{ij}x_i$$

$$g_i=\frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^{r}\lambda_j}$$

式中，y_i 为一组随机变量；λ_i 为其方差；g_i 为第 i 个主成分的贡献率。

(2) 可持续发展协调系数 $\delta(c_1,c_2)$ 模型：

$$\delta(c_1,c_2)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|u_{c_2}(x_i)-u_{c_1}(x_i)\right|$$

式中，c_1 和 c_2 为论域 u 上的两个模糊子集；n 为论域 u 中元素的个数。

距离衰减模式

阎小培，姚一民，陈浩光：改革开放以来广州办公活动的时空差异分析. 地理研究，2000，19(4)

$$d_y=d_0\exp(bx-cx^2)$$

式中，d_0 为中心点所在区域的就业密度；x 为距中心点的距离；d_y 为距中心点 x 处的街区办公就业密度。

区域水环境经济系统结构优化模型

王西琴，杨志峰，刘昌明：区域经济结构调整与水环境保护——以陕西关中地区为例. 自然资源学报，2000，55(6)

1. 产业结构优化模型

(1) 目标函数：

$$\max Z=\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}(Q_{ij}/q_{ij})(1-p_{ij}c_{ij})$$

式中，j 为研究区分区；i 为产业结构；Q 为用水量（$10^8\mathrm{m}^3\cdot\mathrm{a}^{-1}$）；$q$ 为亿元产出需水量 $[10^4\mathrm{m}^3\cdot\mathrm{a}^{-1}\cdot(10^8元)^{-1}]$；$p$ 为亿元产出废水量 $[10^4\mathrm{m}^3\cdot\mathrm{a}^{-1}\cdot(10^8元)^{-1}]$；$c$ 为废水处理费用 $[10^8元\cdot(10^4\mathrm{m}^3)^{-1}\cdot\mathrm{a}^{-1}]$。

在不考虑分区和面源污染的情况下，其表达式为：

$$\max Z=(Q_2/q_2)(1-p_2c_2)+(Q_3/q_3)(1-p_3c_3)$$

式中，Q_2 为工业总用水量($10^8\mathrm{m}^3\cdot\mathrm{a}^{-1}$)；$q_2$ 为工业亿元产出需水量 $[10^4\mathrm{m}^3\cdot\mathrm{a}^{-1}\cdot(10^8元)^{-1}]$；$p_2$ 为工业亿元

产出废水量$[10^4 m^3 \cdot a^{-1} \cdot (10^8元)^{-1}]$；$Q_3$为第三产业总用水量$(10^8 m^3 \cdot a^{-1})$；$q_3$为第三产业亿元产出需水量$[10^4 m^3 \cdot a^{-1} \cdot (10^8元)^{-1}]$；$p_3$为第三产业亿元产出废水量$[10^4 m^3 \cdot a^{-1} \cdot (10^8元)^{-1}]$；$c_2$为工业废水处理费用$[10^8元 \cdot (10^4 m^3)^{-1} \cdot a^{-1}]$；$c_3$为第三产业废水处理费用$[10^8元 \cdot (10^4 m^3)^{-1} \cdot a^{-1}]$。

(2) 约束条件：

1) 资源约束(总用水量约束)：

$$Q_2 + Q_3 \leqslant R_1 \quad R_1 = Q_{总} - (Q_1 + Q_{生活})$$

式中，$Q_{总}$为总供水量$(10^8 m^3 \cdot a^{-1})$；Q_1为农业总用水量$(10^8 m^3 \cdot a^{-1})$；$Q_{生活}$为生活总用水量$(10^8 m^3 \cdot a^{-1})$。

2) 环境约束(总废水量约束)：

$$\frac{Q_2}{q_2} p_2 + \frac{Q_3}{q_3} p_3 \leqslant R_2$$

式中，R_2为总废水排放量$(10^8 m^3 \cdot a^{-1})$。

3) 经济约束(第一产值约束)：

$$GDP_1 \geqslant \frac{PF_p F_c}{O_f / O_a}$$

式中，GDP_1为第一产值；P为总人口；F_p为人均粮食；F_c为粮食单价；O_f为粮食产值；O_a为农业总产值。

2. 工业结构优化模型

(1) 目标函数：

目标函数要求：①在环境、经济平衡前提下，在满足经济发展速度的前提下，COD_{Mn}排放量最小；②在满足渭河COD_{Mn}环境容量要求前提下GDP最大。表达式如下：

$$\min J = \sum_{i=1}^{n} b_i x_i$$

$$\max X = \sum_{i=1}^{n} x_i$$

式中，x_i为工业第i行业的产值，$i = 1,2,3,\cdots,n$为工业行业(n个)，$b_1, b_2, \cdots, b_n$为对应各行业的COD排污系数$(t/10^6元)$；

(2) 约束条件：

1) 工业GDP：

$$\sum_{i=1}^{n} x_i \geqslant R_1$$

式中，R_1为某一水平年的工业生产总值的要求$(10^6元 \cdot a^{-1})$

2) 工业供水量约束：

$$\sum_{i=1}^{n} a_i x_i \leqslant R_2$$

式中，a_i为第i行业万元产值需水系数，R_2为工业用水可供量

3) 工业COD排放总量约束(COD容量约束)：

$$\sum_{i=1}^{n} b_i x_i \leqslant R_3$$

式中，b_i为第i行业万元产值COD排污系数；R_3为工业COD环境容量，即工业水污染控制目标。

4) 工业废水治理费用约束：

$$\sum_{i=1}^{n} c_i x_i \leqslant R_4$$

式中，c_i为第i行业用于治理废水的资金占其年产值的比例系数；R_4为工业废水量治理费用限额

(5) 工业废水产生量约束：

$$\sum_{i=1}^{n} d_i x_i \leqslant R_5$$

式中，d_i为第i行业的废水产生系数(t·百万元$^{-1}$)；R_5为废水产生总量。

土壤侵蚀区位熵 L_i

张志，王少军，赵温霞：湖北省土壤侵蚀景观信息定量研究　水土保持通报，2001，21(2)

$$L_i = \frac{e_i / e_t}{E_i / E_t}$$

式中，e_i为城市中i部门职工人数；e_t为城市中总职工人数；E_i为全国i部门职工人数；E_t为全国总职工人数。

区域资源优势的定量评价模型

黄胜利：区域资源优势的定量评价　资源科学，2001，23(2)

(1) 满意度Q模型：

$$Q_x=\begin{cases}0 & (x_i\leqslant a_i)\\ \dfrac{x_i-a_i}{b_i-a_i} & (a_i<x_i<b_i)\\ 1 & (b_i\leqslant x_i\leqslant b_i^*)\\ \dfrac{a_i^*-x_i^*}{a_i^*-b_i^*} & (b_i^*<x_i<a_i^*)\\ 0 & (x_i\geqslant a_i)\end{cases}$$

式中，Q_x 为任意一点 x_i 的满意度。

(2) 多因子综合评价法则：

1) 代换法则模型：

$$W=1-\prod_{i=1}^{k}(1-Q_i)$$

2) 加法法则模型：

$$W=\sum_{i=1}^{k}Q_iW_i$$

3) 乘法法则模型：

$$W=\prod_{i=1}^{k}Q_i^{W_i}$$

式中，W 为总综合指数；Q_i 为第 i 因子的分指数；W_i 为第 i 因子在总体中的权重贡献；k 为因子个数。

小流域综合治理效益分析模型

杜润塔，杜晓平：铁瓦河典型小流域综合治理效益分析．水土保持通报，2001，21(3)

(1) 静态效益分析——投资回收年限 T_D 模型：

$$T_D=\frac{K}{B-C}$$

式中，K 为治理投资；B 为平均年水保效益；C 为平均年运行费。

(2) 动态经济分析：

1) 投资者算总值 K 模型：

$$K=\sum_{i=1}^{m}K_i(1+r)^{T_i}$$

式中，K_i 为基准年之前 T_i 年的工程投资总额；r 为经济利率；m 为基准年之前工程投资年限。

2) 运行费的折算总值 C 模型：

$$C=\sum_{i=1}^{n}C_i(1+r)^{-T_i}$$

式中，C_i 为基准年之后第 T_i 年的年运行费用；n 为基准年之后工程投资年限。

3) 效益的折算总值 B 模型：

$$B=\sum_{i=1}^{n}B_i(1+r)^{-T_i}$$

式中，B_i 为基准年之后第 T_i 年的年效益。

地下水资源承载力分级的综合评分值α

张鑫，王纪科，蔡焕杰等：区域地下水资源承载力综合评价研究．水土保持通报，2001，21(3)

$$a=\frac{\sum_{j=1}^{3}b_j^k\alpha_j}{\sum_{j=1}^{3}b_j^k}$$

式中，b_j 为各等级隶属度；α_j 为 j 项评分。

区域承载力与承载状况的定量描述

毛汉英等：环渤海地区区域承载力研究．地理学报，2001，56(3)

(1) 状态空间的概念模型：

$$R_{CC}=|M|=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}x_{ir}^2}$$

式中，R_{CC} 为区域承载力值(regional carrying capacity)的大小；$|M|$ 为代表区域承载力的有向矢量的模数；x_{ir} 为区域人类活动与资源环境处于理想状态是在状态空间中的坐标值($i=1,2,\cdots,n$)。

(2) 区域承载力的数学表达式：

$$R_{CC}=|M|=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}w_ix_{ir}^2}$$

式中，w_i 为 x_i 轴的权重。

(3) 区域承载状况的计算公式：

$$R_{CS}=R_{CC}\cos\theta$$

式中，R_{CS} 为现实的区域承载状况(regional carrying state)；R_{CC} 为区域承载力；θ 为现实的区域承载状况矢量与该资源环境承载体组合状态下的区域承载力矢量之间的夹角，其计算公式可可表达为 $\cos|\theta|=\dfrac{(a,b)}{|a||b|}=\dfrac{\sum_{i=1}^{n}x_{ia}x_{ib}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}x_{ia}^2\sum_{i=1}^{n}x_{ib}^2}}$，$a$ 和 b 分别代表状态空间中的 2 个向量，假设其顶点分别为 A 和 B，x_{ia}，

x_{ib} 则代表顶点 A，B 在状态空间中的坐标值（$i=1,2,\cdots,n$），n 代表状态空间的维数。

(4) 对夹角 θ 的符号及现实的区域承载状况与区域承载力关系：

$$\theta\begin{cases}>0, & \forall|RCS|>|RCC| \text{超载}\\ =0, & \forall|RCS|=|RCC| \text{超载}\\ <0, & \forall|RCS|<|RCC| \text{超载}\end{cases}$$

式中，$|RCS|$ 表示现实的区域承载力矢量的模；$|RCC|$ 表示理想状态时的区域承载力矢量的模；θ 为两者的夹角。

流动人口空间分布的空间自相关分析模型

朱传耿等：中国流动人口的影响要素与空间分布 地理学报，2001，56(5)

(1) 全局空间自相关分析模型(Moran I)：

$$I(d)=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}(X_i-\bar{X})(X_j-\bar{X})}{S^2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}}$$

式中，X_i、X_j 分别为位置 i 和位置 j 的观测值；$S^2=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})^2$；$\bar{X}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X_iW_{ij}$ 表示空间权重矩阵的任一元素，其目的是定义空间对象的相互邻接关系，便于把 GIS 数据库中的有关属性数据放到所研究的地理空间上来分析对比。矩阵可表示为：

$$\begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \cdots & W_{1n}\\ W_{21} & W_{22} & \cdots & W_{2n}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ W_{m1} & W_{m2} & \cdots & W_{mn}\end{bmatrix}$$

上述权重矩阵的相邻规则和距离规则分别为：

$$W_{ij}=\begin{cases}1 & \text{（位置}i\text{与位置}j\text{相邻）;}\\ 0 & \text{（位置}i\text{与位置}j\text{不相邻）;}\end{cases}$$

$$W_{ij}(d)=\begin{cases}1 & \text{（位置}j\text{与位置}i\text{在距离范围}d\text{之内）（即位置}i\text{与位置}j\text{相邻）}\\ 0 & \text{（位置}j\text{与位置}i\text{在距离范围}d\text{之外）（即位置}i\text{与位置}j\text{不相邻）}\end{cases}$$

式中，$i=1,2,\cdots,n$；$j=1,2,\cdots,m$；$m=n$ 或者 $m\neq n$。

(2) 局地空间自相关分析模型(local Moran I)

每一个观察值 I 的局地 Moran 统计量如下：

$$I_i(d)=Z_i\sum_{j=1}^{n}W_{ij}Z_j$$

式中，Z_i 和 Z_j 均为观察值的标准变化形式。

可持续发展指标体系的能值分析模型

李双成，傅小锋，郑度：中国经济持续发展水平的能值分析 自然资源学报，2001，16(4)

(1) 净能值产出率(the net energy yield ratio, NEYR)：

$$NEYR=(R+N+IMP)/IMP$$

(2) 能值投资率(the energy investment ratio, EIR)：

$$EIR=IMP/(R+N)$$

(3) 环境负载率(the environmental loading ratio, ELR)：

$$ELR=(IMP+N)/R$$

(4) 基于能值分析的可持续发展指数(energy-based sustainability index, ESI)：

$$ESI=NEYR/ELR$$

式中，R 为可更新资源通过环境系统对社会经济系统产生的作用；N 为不可更新资源；IMP 为社会经济系统在运作过程中同时接收的反馈输入。

第四篇

生 态 学

第十八章　生态学的一般理论与方法

植物生长模型

Harper J L：植物生态学的达尔文方法. Journal of Applied Ecology, 1967, 4(2)

(1) 植物数量及其在单纯林中权重的经验关系式：

$$w = Cp^{-3/2}；\quad y = Cp^{-1/2}$$

式中，w 是每个植物的平均权重；p 是现存植物的密度；y 是每单位面积的平均权重。

(2) 生活在一起的两个物种生长的修正后的 logistic 方程为：

$$\mathrm{d}N_1 = r_1 N_1 \frac{K_1 - N_1 - \alpha N_2}{K_1}$$

$$\mathrm{d}N_2 = r_1 N_1 \frac{K_2 - N_2 - \beta N_1}{K_2}$$

式中，N_1 和 N_2 本别是物种 S_1 和 S_2 的个体数量；r_1 和 r_2 分别是物种 S_1 和 S_2 的内在生长率；K_1 和 K_2 分别是物种 S_1 和 S_2 的能力；α 和 β 是参数，表示物种 S_1 和 S_2 之间的竞争。

空气动力学阻力和风速的关系模型

Landsberg J J, Ludlow M M：确定通过结构复杂的植物边界层的质量传递阻力的技术。Journal of Applied Ecology, 1970, 7(1)

$$r_a = f(u^n)$$

式中，r_a 是空气动力学阻力，当 $n = -0.5$ 时，线性回归方程为 $r_a = 0.04 + 1.27(u^{-0.5})$；$u$ 是风速。

氮和光的系统分析模型

Ross P J, Henzell E F, Ross D R：在草-豆类牧场系统中，氮和光的影响——一种系统分析方法。Journal of Applied Ecology, 1972, 9(2)

(1) 立地中的消光率：

$$I = I_0 \exp(-k_g l_g - k_l l_l)$$

式中，I 是相应高度上的平均光强度；I_0 是草地表面的平均光强度；k_g 和 k_l 是草和豆类的消光系数；l_g 和 l_l 是表面上测得的叶面积指数 I_{la}。

(2) 可用氮的影响：

$$A_g = P_g N/(N_h + N)$$

式中，A_g 是实际光合作用率；N 是可用氮；P_g 是潜在光合作用率；N_h 是在 $A_g = P_g/2$ 时，可用氮水平。

如果可用氮限制了叶面积指数输入率 F_g，而不是实际光合作用率，我们可以令 A_g 等于 P_g，并且有 $F_g = \delta_g A_g N/(N_h + N)$，$\delta_g$ 是当可用氮没有限制时，每单位光合作用的叶面积指数输入率。

叶面能量平衡模型

Gale J：海拔高度和蒸腾作用——特别针对于地中海式气候的某些理论。Journal of Applied Ecology, 1972, 9(3)

单个窄叶片的能量预算：

$$A = R + C + L$$

式中，A 是被吸收的总辐射；R，C 和 L 是消散条件辐射、对流和蒸发潜热。

$$R = 8.28 \times 10^{-11} \varepsilon T_l^4$$

$$C = k_1 \left(\frac{V}{B}\right)^{0.5} (T_l - T_a)$$

$$L = \frac{L[T_l](E[T_l] - H \cdot E[T_a])}{r_l + k_2(B^{0.35} \cdot W^{0.2})/V^{0.55}}$$

式中，ε 是叶片对红外辐射的发射率；T_l 是叶片的温度；k_1 和 k_2 是因子；V 是风速；B 是风向上叶片的宽度；T_a 是大气温度；[ ] 表示函数记号；$L[T_l]$ 是叶面温度下蒸发潜热；$E[T_l]$ 是叶面温度下水蒸气的饱和密度；$E[T_a]$ 是大气温度下水蒸气的饱和密度；H 是相对湿度；r_l 是水蒸气的扩散阻力；W 是叶片风向横断面的宽度。

生物生产量的基本概念及其研究基本途径模型

李文华：森林生物生产量的概念及其研究的基本途径. 自然资源，1978, 1

(1) 生物生产量的基本概念模型：

1) 气候-植被生产力指数 CPV 模型：

$$CPV = \frac{T_V \cdot N \cdot G \cdot E}{T_a \cdot 360 \cdot 100}$$

式中，T_V 为最热月的平均温度；T_a 为最热月和最冷月温度的较差；N 为年降水量；E 为蒸腾系数；G 为气温≥7℃的持续期，且要有 3 个月以上的平均气温不小于6℃

2）生长量气候指数 i 模型：

$$i=\frac{\Delta T\cdot S\cdot P(G-2)}{T_V-10}$$

式中，ΔT 为生长季中平均日最高温与平均夜晚最低温度较差；S 为生长季中平均日长；P 为平均年降水量；G 为平均气温≥10℃的持续期；T_V 为生长季中最热月的平均温度。

3）生物水热潜力 K_P 模型：

$$K_P=\frac{P-S}{R}\cdot\frac{T_V}{36}=\frac{WT_V}{36R}$$

式中，W 为平均年水分总收入；P 为降水量；S 为径流量；T_V 为生长期(旬)；R 为平均年辐射平衡。

(2) 研究森林第一性生物生产量的基本途径，即群体生理-生态学途径：

1）整个群体的总光合作用强度 P_S 模型：

$$P_S=\int_0^F\left(\frac{bI_0e^{-kF}}{1+I_0e^{-kF}}-r\right)\mathrm{d}F$$

或

$$P_S=\sum_{i=1}^{N}\frac{bI_0\left[1-(1-\tau)\frac{uf}{A}\right]^{N_i-1}}{1+aI_0\left[1-(1-\tau)\frac{uf}{A}\right]^{N_i-1}}uf-ruf$$

式中，I_0 为林冠上的光强；$\frac{uf}{A}$ 为叶面积指数；r 为单位叶面积的呼吸强度；τ 为叶子的透射率；a，b 为常数；N_i 为植物群落的冠层平面数；A 为面积；u 为面积为 A 的空间中的叶子数；f 为平均叶面积。

2）林冠生物生产量 $I(z)$ 的新模型：

$$I(z)=KI_0e^{-kF(z)}/(1-m)$$

式中，I 为叶表面的平均光强；z 为第 z 个平面；m 为叶子的平均透光度；K 为叶子的消光系数；I_0 为冠层上方的光强

3）林冠总呼吸作用 R 模型：

$$R=\int_0^F r\mathrm{d}F=\frac{1}{yk}\ln\frac{1+(y/x)}{1+(y/x)e^{-kF}}$$

4）林冠层中叶绿素含量 C_{HLF} 模型：

$$C_{HLF}=\int_0^F C_{HL}\mathrm{d}F=\frac{1}{BK}\ln\frac{1+(B/A)}{1+(B/A)e^{-kF}}$$

式中，C_{HL} 为叶子的叶绿素含量。

动态模型中的参数算法

Benson M：动态模型中的参数。Ecological modelling，1979.6

(1) 交互式方法：

对于下面的动态模型：

$$y'=g(t,y,p)$$

$$y(t_0)=y_0(p)$$

式中，y 是一个长度为 n 的状态向量；p 是一个长度为 m 的参数向量；t 是为方便起见我们称之为时间的自变量；′ 表示对于时间的区别。对于上面的初始值问题，我们有一系列的观测值 $v_1,\cdots,v_k$。

定义长度 kr 的加权残留向量 f 为：

$$f_{r(i-1)+s}=w_{r(i-1)+s}[y_{j(s)}(t_i)-v_{is}]$$

式中，$s=1,\cdots,r$；$i=1,\cdots,k$；v_{is} 是 v_i 的组分 s；$y_{j(s)}(t_i)$ 是向量 $y(t_i)$ 的相应元素；$w_{r(i-1)+s}$ 是一个权重因子；使 p 最小化的加权最小平方问题可表达为 $F(p)=\|f(p)\|_2^2$，$\|\|_2$ 表示欧几里得向量范数。

已知向量函数 $s(t)$ 代表一个对于状态向量 $y(t)$ 观测值成分滤波的成分，我们推导出合适方法找到最小化的参数向量 p 表达为 $\sum_{i=1}^{k}\|g(t_i,s(t_i),p)-s'(t_i)\|_2^2$，点 t_i 是观测时间，使 p 达到最小化的整体适合方法可表达为 $\sum_{i=1}^{k}\left\|y(t_0)+\int_{t=t_0}^{t=t_i}g(t_i,s(t_i),p)\mathrm{d}t-s(t_i)\right\|_2^2$。

(2) 专用算法：

当观测值的两个状态变量中只能得到一个时，我们考虑特殊的技术。假设观测值得不到第二个状态变量。c_i 是在时间 t_i 未观测到的状态变量的近似值。我们寻找 p 和 $c=(c_0,\cdots,c_k)$ 的最小值，即：

$$F=\sum_{i=0}^{k}(g_1[i]-s'(t_i))^2+\sum_{i=1}^{k}(d_i(c))^2$$

式中，$g_j[i]=g_j(t_i,(s(t_i),c_i),p)$，$j=1,2$；$d_i(c)$ 表示第二个状态方程的离散化形式。

如果使用梯形方法来离散化第二个状态方程，则：

$$d_i(c)=(g_2[i-1]+g_2[i])/2-(c_i-c_{i-1})/(t_i-t_{i-1})$$

式中，最小化的一个必要条件是对于 c 和 p 的 F 梯度

满足：$\text{grad}(F)=0$。

初级生产力分段线性模拟模型

Cale W G, Jr：使用分段稳定性、分段线性数学方法模拟草原的初级生产力。Ecological Modelling, 1979, 7

(1) 模拟草原的初级生产力：

在这个模型中由 Thornth Waite-Mather 方程计算潜在蒸散 E_p：

$$E_p = 16(10T/I)^a \quad (T>0)$$

式中，$a=(0.675I^3-77.1I^2+17920I+492390)\times10^{-6}$；$I=\sum_1^{12}\left(\frac{T}{5}\right)^{1.514}$；$T$ 是温度。

(2) 潜在毛生产力(PGP)：

$$PGP=(S\cdot S_{EEF})\cdot(P_{TMP}\cdot T_{EEF})\cdot(E_{VAP}\cdot M_{EEF})\cdot S_{CON}$$

式中，S 是太阳辐射；S_{EEF} 是 S 的效率；P_{TMP} 是正温度；T_{EEF} 是 P_{TMP} 的效率；E_{VAP} 是土壤水分蒸发蒸腾损失总量；M_{EEF} 是 E_{VAP} 的效率；S_{CON} 是转化因子。

(3) 初级净生产力(NPP)占毛生产力的 66%，寒冷季节草原的潜在净生产力为：

$$P_{p2}=NPP\cdot P_{c2}$$

式中，P_{c2} 是生产力因子。

生态建模的整体分析方法

Jørgensen S E, Mejer H：生态建模的整体分析方法。Ecological Modelling, 1979, 7

生态缓冲能力 β 被定义为相对于所考虑的状态变量(例如，可溶性磷的浓度)的变化的摄入量(例如，磷的输入)的变化：

$$\beta'_j=\partial L/\partial X_j$$

$$\beta_j=\partial X/\partial X_j$$

$$\underset{i\neq j}{\forall}\ X_i=X_i^{obs}$$

式中，X_i 和 X_i^{obs} 分别是模型和被模拟系统的状态变量；L 是一个外部变量，并且 $X=\sum_i X_i$。

J.W. Forrester 世界动态模型

Klaassen H L, Ooms G, Paelinck J et al：J.W. Forrester 的世界动态模型的形式结构研究。Ecological Modelling, 1980, 8

$$Bx_t=Ax_{t-1}+EI$$

式中，A 是跃迁矩阵(在时间点 t 和 $t-1$ 时变量之间的关系)，阶数为 36×36；B 是在某一时间点的同步关系矩阵，阶数为 36×36；E 是与外生变量的链接矩阵，阶数为 36×16；x_t，x_{t-1} 是在时间点 t 和 $t-1$ 时内生变量的向量，阶数为 36×1；I 是单位列向量，阶数为 16×1。

倍增灵敏度分析模型

Majkowski J, Ridgeway J M, Miller D R：倍增灵敏度分析及其在仿真模型开发中的角色。Ecological Modelling, 1981, 12

任何仿真模型的运行都取决于大量的输入参数 p_i ($i=1,2,\cdots,m$)。然后要设计模型的输出值 X_j ($j=1,2,\cdots n$)，并假定它们完全由参数 p_i 的值来确定。p_i^0 ($i=1,2,\cdots,m$) 表示输入参数的最好的估计值；X_j^0 ($j=1,2,\cdots,n$) 表示相应的模型预测值。这些值被称为“参照案例”。

(1) 定义一个自由变量集合 f_i ($i=1,2,\cdots,m$)，它将在一个倍增模式中，影响 p_i^0 的值，即：

$$p_i=p_i^0 f_i$$

式中，期望 f_i 的经验分布满足倍增对称状态是合理的，且在 $\alpha>0$ 时，$\text{Prob}(f_i>\alpha)=\text{Prob}(f_i<1/\alpha)$。

(2) 定义一个偏差测度值 D 来估算参照值和扰动模拟值之间的差异：

$$D=\prod_{j=1}^{n}\frac{X_j}{X_j^0}$$

假设 $\ln D$ 是一个线性函数，表达为 $z_i=\ln(f_i)$，则在 $z_i=0$ 附近用泰勒级数扩展 $\ln D$ 的表达式为：

$$\ln D\approx\ln D(z=0)+\sum_{i=1}^{m}[\partial\ln D/\partial z_i]_{z=0}z_i$$

SO_2 干燥沉积与草原硫循环的关系模型

Coughenour M B：SO_2 干燥沉积与草原硫循环的关系。Ecological Modelling, 1981, 13

(1) SO_2 阻力和水蒸气扩散的关系：

$$r_{SO_2}=r_{H_2O}\frac{D_{H_2O}}{D_{SO_2}}$$

(2) 进入树叶的路径总阻力：

$$r=r_a+r_b+\frac{r_s r_c}{r_s+r_c}$$

式中，r_a 是空气动力学阻力；r_b 是树叶形状对阻力的影响；r_s 是气孔阻力；r_c 是表皮阻力。

上面计算的扩散到每个不同汇点的阻力最终被用来

产生一个在模拟过程的溶解间隔(1 天)中的绝对流量，关系表达式为：$F=\frac{C}{r}$，F 是流动速率，C 是浓度，r 是在 C 被测点的总阻力。

(3) 树叶表面或内部的流量：

$$F=\frac{C}{r}I_{la}$$

式中，I_{la} 是叶面积指数。

(4) 总的系统流量(T_{SF})：

$$T_{SF}=\sum_{i}^{n}\sum_{j}^{n}F_{ij}$$

式中，F_{ij} 是从状态变量 i 到状态变量 j 的累积流量；n 是状态变量的总数。

(5) 模拟期间，由于 SO_2 的硫输入导致的 T_{SF} 增加：

$$\Delta T_{SF}=T_{SFSO_2}-T_{SFcontrol}$$

SO_2 对 T_{SF} 的间接影响可表达为：

$$\Delta T_{SFindirect}=\Delta T_{SF}-\sum_{j}^{m}F_{kj}$$

式中，k 是大气层区室的指数；m 是来自大气层的流量的总数。

模型的可靠性指数

Leggett R W, Williams L R：模型的可靠性指数 Ecological Modelling, 1981, 13

(1) 已知模型的预测值 $x_1,x_2,\cdots,x_n$ 和相应的观测值 $y_1,y_2,\cdots,y_n$，由几何方法导出下面的公式：

$$k_g=\frac{1+\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left[\frac{1-(y_i/x_i)}{1+(y_i/x_i)}\right]^2}}{1-\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left[\frac{1-(y_i/x_i)}{1+(y_i/x_i)}\right]^2}}$$

(2) 由统计学方法导出下面的公式：

$$k_s-\exp\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\lg\frac{y_i}{x_i}\right)}$$

基于回归的非线性分解模型

Portier K M, Ewel K C：基于回归的非线性分解模型的可信带，Ecological Modelling, 1981, 14

(1) 模型的回归方程：

$$X_i^0=f_i(U^0,\theta)+e$$

式中，$X_i^0=(x_{i1},\cdots,x_{in})$ 表示第 i 个模型因变量的观测值，$i=1,2,\cdots,L$；$U^0=\begin{bmatrix}u_{11}\cdots u_{1m}\\ \vdots \quad \vdots\\ u_{n1}\cdots u_{nm}\end{bmatrix}$，$U^0$ 表示与模型自变量 U 有关的观测值；θ 是一个 $(p\times1)$ 模型参数向量；$e=(e_1,\cdots,e_n)$ 表示经验或者观测误差，假定它符合具有零平均值和未知方差 σ^2 的正态分布；函数 f_i 通常是非线性的，是为向量 U 和 θ 提供 X_i 值的运算法则；通常我们可以得到用 $\hat{\theta}$ 表示的参数 θ 的最小平方估计值。

令 $F(\theta)$ 为元素的 $(n\times p)$ 矩阵，则：

$$(\partial/\partial\theta_j)[f_i(U_k,\theta)]$$

式中，i 表示感兴趣的因变量；j 是矩阵的列指数；k 是矩阵的行指数；向量 $U_k=(U_{k1},\cdots,U_{km})$ 表示自变量的第 k 个观测值。

(2) 定义 $Z^0=X_i^0+f_i(U^0,\theta)+F(\theta)\cdot\theta$，且 $W=F(\theta)$，则一个伪线性回归模型可以被定义为：$Z^0=W\theta+e$。

通过伪模型的迭代获得的参数估计值 $\hat{\theta}$ 是平均值为 θ 的符合渐进多元正态分布的随机变量；变量协方差矩阵为 $V=\sigma^2[F(\theta)'F(\theta)]^{-1}$；误差变量的最小平方估计值 s^2 和变量协方差矩阵 $\hat{V}$ 分别可表达为：

$$s^2=[1/(n-p)]\sum_{k=1}^{n}[X_{ik}-f_i(U_k,\hat{\theta})]^2$$

$$\hat{V}=s^2[F(\hat{\theta})'F(\hat{\theta})]^{-1}$$

上述两式中的分布属性可以用来为 θ 建立一个近似的连接置信区域，其表达式为：

$$\{\theta:[(\theta-\hat{\theta})'\boldsymbol{F}(\hat{\theta})'\boldsymbol{F}(\hat{\theta})(\theta-\hat{\theta})]/s^2$$
$$<[(n-1)^p/(n-p)]F_{1-\alpha}(p,n-p)\}$$

式中，$F_{1-\alpha}(p,n-p)$ 是一个来自于带有 p 和 $n-p$ 自由度的 F 分布的 $1-\alpha$ 百分点。

一旦得到最小平方估计值 $\hat{\theta}$，就可以在方程中利用这个估计值建立合适的函数 $X_i=f_i(U,\hat{\theta})$ 通过定义两个函数可以获得预测曲线的可信带，f_L 是下限，f_U 是上限，因此真实曲线位于这两个函数之间的概率等于一个特定的值。$(1-\alpha)100\%$ 可信带可以被定义为：

$$f_L(U)=\min_{\theta\in CR}[f(U,\theta)]$$

$$f_U(U)=\max_{\theta\in CR}[f(U,\theta)]$$

式中，CR 是得到的 θ 的近似置信区域。

太阳辐射的计算方程

Brock T D：生态学研究中太阳辐射的计算. Ecological Modelling, 1981, 14

(1) 计算大气层顶部的太阳辐射 I_1：

$$I_1=I_0/R_1^2\cos Z$$

式中，I_0 是太阳常数；R_1 是矢径；Z 是天顶角。

(2) 水生生态学文献中经常使用的 Vollenweider (1965)方程：

$$I_4=I_5/2\{1+\cos[2P_1(T-12)/L_1]\}$$

式中，I_5 是中午太阳周围每小时单位面积上的太阳辐射；T 是以小时为单位的白昼时间；L_1 是以小时为单位的白昼长度；I_4 是任何一小时中每单位面积的太阳辐射。

(3) 太阳辐射的每天综合值：

$$I_6=(24/P_1)(I_0/R_1^2)[W_1P_1/180\sin L\times \sin D_1-\sin W_1\cos L\cos D_1]$$

式中，W_1 是日落高度角；P_1 是 π 的值；L 是纬度；D_1 是地球的倾角。

(4) 给定时间段的辐射 IH：

$$\mathrm{IH}=I_2/P_1I_0/R1^2\{\cos D_1\cos L[\sin(W_2E)-\sin(W_2B)]+P_1/180(W_2E-W_2B)\sin D_1\sin L\}$$

式中，时角 W_2 的值从感兴趣的时间间隔的开始(W_2B)到结束(W_2E)来计算。

(5) 平均太阳辐射的估算：

$$I_2/I_6=A+[B(N_1/L_1)]$$

式中，I_6 是大气层外部的辐射；N_1 是某一天测定的光照时数；A 和 B 是系数。

(6) 晴朗天空辐射的估算：

Farber 和 Morrison (1977)的数据适合下面的回归方程：

$$辐射=1121(\cos Z-0.08251)$$

一个更通用的方法还要考虑气候因素，即：

$$\mathrm{IC}=\mathrm{IH}\cdot T_R\cos Z$$

式中，TR 是传输因子。

(7) 直接辐射和散射辐射的传输系数：

$$\mathrm{TD}=0.2710-0.2939T_R$$

散射辐射的计算方程：

$$\mathrm{ID}=\mathrm{IH}\cdot T_D\cos Z$$

如果想得到总的晴朗天空辐射 IT，则直接辐射和散射辐射部分被加入，即：IT = IC + ID。

多元灵敏度的运算法则

Huson L W：用绘图法来辅助多元灵敏度分析. Ecological Modelling, 1982, 16

令 S 为由模型运行 n 次产生的平均中心灵敏度数据矩阵派生的协方差矩阵，l_1、l_2 和 c_1、c_2 分别表示前两个潜在的根和 nS 的向量，则 Biplot 的坐标由下式给出：

$$G=[(1/\sqrt{l_1})D_r c_1;(1/\sqrt{l_2})D_r c_2]\sqrt{n}$$

$$H=[\sqrt{l_1}c_1;\sqrt{l_2}c_2]1/\sqrt{n}$$

式中，D_r 是平均中心灵敏度数据矩阵。

生态学中的奈曼 A 型分布模型

陈敦隆：计算广义分布的方法. 生态学杂志, 1982, 2

$$\pi_i=e^{-\lambda_1}\frac{\lambda_2^i}{i!}\sum_{j=0}^{\infty}\frac{(\lambda_1e^{-\lambda_2})^j}{j!}j^i$$

$$i=0,1,2,\cdots$$

式中，π 为取样单位中有 i 个个体的概率；式中的 j，z=0,1,2,…，i 为个体数目，j 为个体 i 相应的群数；λ_1 和 λ_2 分别为 p_r 和 q_k 服从波阿松分布时各其的期望值，p_r 为一个取样中 r 个群的概率；q_k 为每一群内有 k 个个体的概率。

海水中叶绿素的测定方法

费尊乐：海水中叶绿素的测定. 生态学杂志, 1983, 1

(1) 分光光度法——朗伯-比尔定律模型：

$$D(\lambda)=K(\lambda)LC$$

式中，$D(\lambda)$ 为待测溶液在波长 λ 上的吸光度；$K(\lambda)$ 为吸光系数；L 和 C 分别为待测溶液的吸收层厚度和浓度。

(2) 荧光法——荧光强度 F 模型：

$$F = K\Phi I\varepsilon Lc$$

式中，K 为测试仪器常数；Φ 为荧光物质的荧光效率；I 为入射激发光强度；L 为样品池光程长度；ε、c 分别为荧光物质的吸光系数和浓度。

土壤动物的采集和调查的数学模型

张骘：土壤动物的采集和调查方法 生态学杂志，1983，3

（1）中、小型土壤动物——生物量模型：

$$W_1 = W\left(\frac{a_1 b_1}{ab}\right)^{2/3}$$

式中，W_1 为所求种的湿重；W 为体形相似种的湿重；a、b 分别为上述种的体长和体宽；a_1、b_1 为所求种的体长和体宽

（2）微小土壤动物——生物量 A 模型：

$$A = \frac{S}{s}\frac{s+V}{a}m$$

式中，S 为平均一平方米材料之干重；s 为培养皿中方入材料之干重；V 为使材料湿性达到 100%所加蒸馏水量；a 为镜检水之重量；m 为镜检出动物的平均值

环境状态矢量的空间模型

Pattern B C：生境 物种水质量标准和协议的系统理论公式。Ecological Modelling, 1984, 23

定义环境(生态系统) $\boldsymbol{E}$ 为生物物种 $\boldsymbol{S}$ 的集合；非生物物质 $\boldsymbol{R}$（资源、有毒物质等）；三种交互作用 $\boldsymbol{I}$，即 $\boldsymbol{S}\times\boldsymbol{S}$、$\boldsymbol{S}\times\boldsymbol{R}$ 和 $\boldsymbol{R}\times\boldsymbol{R}$；输入量 Z 和输出量 Y：

$$\boldsymbol{E} = \{\boldsymbol{S}, \boldsymbol{R}, \boldsymbol{I}, Z, Y\}$$

$\boldsymbol{E}$ 的状态矢量空间表示为：

$$\phi : Z\times\{\boldsymbol{S},\boldsymbol{R},\boldsymbol{I}\} \to \{\boldsymbol{S},\boldsymbol{R},\boldsymbol{I}\}$$

$$\rho : Z\times\{\boldsymbol{S},\boldsymbol{R},\boldsymbol{I}\} \to Y$$

式中，在一般情况下，状态变量的某个集合是来自于 $\boldsymbol{S}$、$\boldsymbol{R}$ 和 $\boldsymbol{I}$；表达式把环境 $\boldsymbol{E}$ 作为一个通常受到保护的动力学系统来进行模拟。

为了建立生境－物种标准和协议，特定的系统 $E=\{S,R,I,Z,Y\}$ 必须被考虑到，也就是说系统要通过特定的状态矢量空间来描述：

$$\phi : Z\times\{S,R,I\} \to \{S,R,I\}$$

$$\rho : Z\times\{S,R,I\} \to Y$$

式中，$S\subset\boldsymbol{S}$，$R\subset\boldsymbol{R}$ 且 $I\subset\boldsymbol{I}$。

地下生产模型

Morris J T, Houghton R A, Botkin D B：spartina alterniflora 地下生产的理论限制－建模分析 Ecological Modeling, 1984, 26

（1）总净生产率：

$$P_T = \psi TNF\sin\beta\{\ln[L_i\exp(\alpha B_c/\sin\beta)+\lambda] - \ln[L_i+\lambda]\}/[\alpha(N+\eta)] - \rho T(FB_c+B_b)$$

（2）净地上生产率：

$$P_a(t) = B_T(t-\Delta t) - B_1(t)$$

（3）净地下生产率：

$$P_b(t) = P_T(t) - P_a(t)$$

（4）活的地下生物量：

$$B_b(t+\Delta t) = B_b(t) + P_b(t) - lB_b(t)$$

式中，B_b 是根系和根状茎的活的干生物量；P_a 是净地上生产；P_b 是根系和根状茎的净干物质生产；P_T 是总的净干物质生产；β 是太阳高度角；l 是地下生物量的重量损失率；B_c 是植冠的总干物质；B_T 是地上生产的总累积；F 是绿叶重量的份额，即总植冠重量；L_i 是植冠顶部的太阳辐射；N 是干叶片中的氮浓度；T 是大气温度。

生态建模中的弹性数学模型

Mehandjiev M R：应用于生态建模中的累积过程的热动力学 Ecological Modelling, 1984, 26

（1）系统的内能值：

$$U = \sum_{k=1}^{n} E_k$$

式中，E_k 是基本能量，它是时间 t 和一对单一能量的共轭状态变量——P_k（强度因子）和 X_k（能力因子）的函数。

（2）弹性的数学模型表示为多能共轭方程：

$$\prod_{r=1}^{j} P_r^{\theta_r^0} \prod_{i=j+1}^{n} X_i^{\pm\theta_i^0} = \text{常数} \quad (r+i=n>2)$$

$$T\prod_{r=1}^{j} P_r^{\bar{\theta}_r} \prod_{i=j+1}^{n} X_i^{\pm\bar{\theta}_i} = \text{常数} \quad (r+i+l>2)$$

生态位的定义及计测生态位重叠的改进公式

王刚，赵松岭，张鹏云等：关于生态位定义的探讨及生态位重叠计测公式改进的研究．生态学报，1984，4(2)

改进的计测生态位重叠的离散型公式：

$$N.O.=\frac{\sum_{i_1}\cdots\sum_{i_n}\varphi(x_1^{i1},x_2^{i1},\cdots,x_n^{in})l_1^{i1}l_2^{i2}\cdots l_n^{in}}{\max\begin{bmatrix}\sum_{i_1}\cdots\sum_{i_n}f_1(x_1^{i1},x_2^{i2},\cdots,x_n^{in})l_1^{i1}l_2^{i2}\cdots l_n^{in},\\ \sum_{i_1}\cdots\sum_{i_n}f_2(x_1^{i1},x_2^{i2},\cdots,x_n^{in})l_1^{i1}l_2^{i2}\cdots l_n^{in}\end{bmatrix}}$$

式中，$\varphi(x_1^{i1},x_2^{i2},\cdots,x_n^{in})=\min\begin{bmatrix}f_1(x_1^{i1},x_2^{i2},\cdots,x_n^{in}),\\ f_2(x_1^{i1},x_2^{i2},\cdots,x_n^{in})\end{bmatrix}$；$x$ 自变量；f_1 和 f_2 为基础生态位；$l_j^{ij}=x_j^{ij}-x_j^{ij-1}$ 为生态因子间隔。

冬小麦生长率及麦田能量收支分析模型

董振国：冬小麦生长率及麦田能量收支分析．生态学杂志，1984，4

(1) 冬小麦不同发育阶段生长分析：

1) 生长率 $\overline{C}$ 模型：

$$\overline{C}=\frac{W_2-W_1}{T_2-T_1}$$

2) 相对生长率 $\overline{R}$ 模型：

$$\overline{R}=\frac{L_nL_2-L_nL_1}{T_2-T_1}$$

3) 净同化率 $\overline{E}$ 模型：

$$\overline{E}=\frac{W_2-W_1}{T_2-T_1}\cdot\frac{L_nL_2-L_nL_1}{L_2-L_1}$$

4) 叶面积比率 $\overline{F}$ 模型：

$$\overline{F}=\frac{(L_1/W_1)+(L_2/W_2)}{2}$$

式中，W_1，W_2 和 L_1、L_2 分别为前后两次观测植株干重和叶面积。

(2) 麦田活动层的辐射平衡：

麦田活动层辐射平衡方程：

$$B=Q(1-A)-F$$

式中，B 为辐射平衡又称净辐射；Q 为太阳总辐射；A 为反射率；$F=U-SG$，F 为长波有效辐射，U 为农田活动层长波辐射；G 为大气逆辐射；S 为农田活动层对长波辐射的吸收率或称发射系数。

(3) 麦田活动层热量平衡特征及小麦不同发育期需水量：

麦田活动层热量平衡方程：

$$B=P+LE+Q_S$$

$$P=C_P\rho K_T\frac{\partial T}{\partial Z}$$

$$LE=L\rho K_W\frac{\partial q}{\partial Z}$$

式中，B 为净辐射；P 为活动层与空气间的湍流热交换通量；LE 为麦田总蒸发耗热量；Q_S 为麦田土壤表面与土壤深层的热交换通量；C_P 为空气定压比热；L 为蒸发潜热；ρ 为空气密度；K_T，K_W 分别为空气热量和水汽的湍流交换系数；$\frac{\partial T}{\partial Z}$、$\frac{\partial q}{\partial Z}$ 分别为空气温度和空气湿度的垂直梯度。

人工林水量平衡的计算方程

焦树仁：樟子松人工林蒸腾耗水量的初步研究．生态学杂志，1984，6

$$\Gamma_f+Q_f=(Q_1+Q_2)+\Pi+(E_1+E_2)+S+\Delta W_1+\Delta M$$

式中，Γ_f 为透过林冠的降水量；Q_f 为树干径流；Q_1 和 Q_2 为地表和地中径流；Π 为深层入渗量；E_1 和 E_2 为地表的物理蒸发和蒸腾；S 为乔灌木根系的吸水量；ΔW_1 为土壤储水量的变化；ΔM 为订正值。

模糊度 $D(\underset{\sim}{A})$ 模型

杨凤翔：试论α 水平截集 A_α 在生态学中的应用．生态学杂志，1985，1

$$D(\underset{\sim}{A})=K\sum_{i=1}^{n}S(\mu_A(x))$$

$$K=\frac{1}{n}\ln 2$$

式中，$\mu_A(x)$ 为仙农函数。

数学模型的清晰度、精确度指数

Costanza R, Sklar F H：数学模型的清晰度、精确度和有效性－淡水沼泽应用回顾．Ecological Modeling, 1985,27

(1) 清晰度指数：

比较模型的清晰程度，可以用三个主要的清晰度模式——成分、空间和时间来建立清晰度指数：

$$A_i=\frac{N_i-1}{k_i+(N_i-1)}\times 100$$

式中，A_i是模式i的清晰度指数；N_i是模式i中分区的数量；k_i是模式i的换算因子。

每一种模式中的分区数量可表达为：成分模式(N_c)为成分或者状态变量的数量；时间模式(N_t)为时间阶段的数量；空间模式(N_s)为空间单元的数量

(2) 利用成分或者空间单元对精确性进行描述，其指数可表达为：

$$I_{dec} = \frac{|m_{odel} - d_{ata}|}{d_{ata}}$$

吻合度检验模型

Halfon E：有最好的模型结构吗？III. 检验吻合度．Ecological Modelling, 1985, 27

(1) 评估者的吻合度：

$$e_{\mu a} = y_{\mu a} - \hat{y}_{\mu a}$$

式中，y是观测值；$\hat{y}$是模型的输出值；μ表示第μ个观测值；a表示第a个状态变量。

(2) 作为吻合度的加权最小平方数：

$$\phi = \sum_{a=1}^{m}\sum_{\mu=1}^{r} w_{\mu a} e_{\mu a}^2$$

另外的一个特殊情况是通过变量加权并且权重独立于μ，即：$\phi = \sum_{a=1}^{m} w_a \sum_{\mu=1}^{n} e_{\mu a}^2$，其吻合度标准的可能性函数可表达为：

$$L(p,\psi) = p(E(p)|\psi) = p(y-(\hat{y}(p))|\psi)$$

式中，$E(p)$是参数的期望值；ψ是另外的已知或未知的参数；p是已知ψ时，$E(p)$的概率密度。

(3) Theil 不等式系数：

$$\phi = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{n}\sum(y-\hat{y})^2\right)}}{\sqrt{\left(\frac{1}{n}\sum\hat{y}^2\right)} + \sqrt{\left(\frac{1}{n}\sum y^2\right)}} \quad (0 < \phi < 1)$$

式中，n是样本点数。此指数考虑到了平均值中的差异、标准差中的差异以及预测数据和观测数据之间的不完全共变。

(4) 另一个标准类似于χ^2统计：

$$\phi = \sum\frac{(y-\hat{y})^2}{y}$$

(5) 当状态变量和输出变量都能与观测值相比较时，则下面的误差函数，它也是一个加权最小平方数，能够被用来检验吻合度：

$$\phi = \sum_{i=1}^{n}\left(e_1^{\mathrm{T}} Q e_1 - e_2^{\mathrm{T}} R e_2\right)$$

式中，$e_1 = x - \hat{x}$和$e_2 = y - \hat{y}$均为向量；Q和R是非负加权系数。

植物中资源冲突的空间分析模型

Wu HI, Sharpe PJH, Warker J et al. 生态学的土地理论－植物中的资源冲突的空间分析．Ecological Modelling, 1985, 29

(1) 冲突潜力：

冲突潜力Φ是一个多个系统参数s_j的连续函数，可表达为：

$$\Phi = \Phi(s_1, s_2, \cdots, s_j, \cdots)$$

式中，s_j表示一些系统参数(例如：水分、光照、营养和毒素)。

(2) 根部的影响$\varepsilon_{R_i}(r)$：

$$\varepsilon_{R_i}(r) = \frac{b_i + c_i \exp[-\beta_i|r - r_i|]}{1+\exp[\mu_i((r-r_i)^2 - a_i^2)]}$$

式中，r_i是植物i的位置；a_i、b_i、c_i、β_i和μ_i是物种参数；a_i是根系外围的半径；b_i是在伸展区域里相同的根系影响力；c_i是接近茎部的除了b_i之外的根影响力；β_i是接近茎部的对于ε_{R_i}的根影响力的修正系数；μ_i是外围附近的对于ε_{R_i}的根影响力的衰减系数。

(3) 森林树木物种之下的第i个体在地面以上的植冠影响力$\xi_{C_i}(r)$：

$$\xi_{C_i}(r) = \xi_{C0i}\exp[-\gamma_i(r-r_i)^2]$$

式中，ξ_{C0i}是植物i的最大植冠影响力；γ_i是依赖于物种的参数。

(4) 茎部影响力$\xi_S(r)$：

$$\xi_{S_i}(r) = \exp[-\sigma_i|r - r_i|]$$

式中，σ_i是茎部影响力的衰减系数。

(5) 单个个体影响下的水分可用性：

$$H = H_0(1-h_R\xi_R)(1-h_C\xi_C)(1+h_S\xi_S\pi\,\xi_{C0}/\gamma)$$

式中，H_0是不受相邻植物影响下的某一点处的水分可用性；h_R，h_C和h_S是根、植冠和茎对水分可用性影响力的权重因子。

(6) 正规化初始相对生长率 G_0：

$$G_0 = \frac{BINH}{N[\lambda_{21} - H + I(1-H)] + IH}$$

式中，B 是一个通用的正规化因子；I 是光照强度；N 是有限的营养；H 是水分可用性；λ_{21} 是从光照到生物量的平均转化率。

(7) 在点 $r(x,y)$ 处的冲突潜力 $\Phi(r)$：

$$\Phi(r) = 1 - G_0(r)$$

式中，$G_0(r)$ 是位于 $r(x,y)$ 点处的秧苗的正规化生长方程

吉良热量指数

徐文铎：吉良的热量指数及其在中国植被中的应用。生态学杂志，1985，3

(1) 温暖指数 I_w 模型：

$$I_w = \sum_n (t-5)$$

(2) 寒冷指数 I_c 模型：

$$I_c = -\sum_n (5-t)$$

式中，t 为月平均气温。

重要值—面积曲线模型

王伯荪，李鸣光：重要值—面积曲线在热带亚热带雨林中的应用。植物生态学与地植物学学报，1986，10(3)

(1) 重要值 $IV_k^{(n)}$ 模型：

$$IV_k^{(n)} = \left(\frac{\sum_{l=1}^{n} S_{kl}}{\sum_{l=1}^{n} SS_l} + \frac{\sum_{l=1}^{n} T_{kl}}{\sum_{l=1}^{n} TT_l} + \frac{\sum_{l=1}^{n} F_{kl}}{\sum_{l=1}^{n} FF_l} \right) \times 100$$

$$SS_j = \sum_{i=1}^{m} S_{ij}$$

$$TT_j = \sum_{i=1}^{m} T_{ij}$$

$$FF_j = \sum_{i=1}^{m} F_{ij}$$

式中，$IV_k^{(n)}$ 为 $n \times 10 \times 10\text{m}^2$ 集合取样内第 k 种的重要值；S_{kl}、T_{kl} 和 F_{kl} 分别为该取样内第 k 种的胸高端面积和、株数和、以及频度和=1；$\sum_{i=1}^{m} S_{ij}$，$\sum_{i=1}^{m} T_{ij}$ 和 $\sum_{i=1}^{m} F_{ij}$ 分别为该取样内所有 m 种的胸高端面积和、株数和、以及频度和=m。

(2) 重复 q 次随机取样模型：

$$\left(\overline{\text{DIV}_k^{(n)}}\right)_q = \frac{1}{q} \sum_{p=1}^{q} \left| IV_k^{(n)} - IV_k^{(n-1)} \right|_p$$

式中，$\left(\overline{\text{DIV}_k^{(n)}}\right)_q$ 为重复 q 次随机集合取样中，第 k 种在 $n \times 10 \times 10\text{m}^2$ 集合取样与 $(n-1) \times 10 \times 10\text{m}^2$ 集合取样重要值之差的平均值；$\left| IV_k^{(n)} - IV_k^{(n-1)} \right|_p$ 为第 p 次重复随机集合取样程序中 $IV_k^{(n)} - IV_k^{(n-1)}$ 的绝对值。

净当前价值(NPV)的计算公式

Goodland R，Ledec G：可持续发展的新古典经济学和原理. Ecological Modelling, 1987, 38

世界银行项目中使用的经济学成本-收益分析(CBA) 规则是 NPV：

$$NPV = \frac{B_1 - C_1}{1+r} + \frac{B_2 - C_2}{(1+r)^2} + \cdots + \frac{B_n - C_n}{(1+r)^n}$$

式中，B_n 是在年份 n 收益的货币价值；C_n 是在年份 n 成本的货币价值；r 是贴现率；B 和 C 是关于上面提及的项目中提出的人类福利中的任何收益(或损失)的货币价值。

两个生态环境相似性计算模型

袁嘉祖：两个生态环境相似性计算方法的探讨. 生态学杂志，1987，6(6)

(1) 绝对距离优先比：

1) 绝对距离模型：

$$\begin{cases} D_{ik} = |x_k - x_i| \\ D_{jk} = |x_k - x_j| \end{cases}$$

式中，x_i、x_j 为任意给定的两个样品；x_k 为固定样品。

2) 相似优先比模型：

$$\begin{cases} r_{ij} = \dfrac{D_{jk}}{D_{ik} + D_{jk}} \\ r_{ji} = 1 - r_{ij} \end{cases}$$

(2) 欧氏距离相似优先比：

1) 欧氏距离模型：

$$D_{ik}=\sqrt{\frac{1}{m}\sum_{s=1}^{m}(x'_{is}-x'_{ks})^2}$$

2）相似优先比模型：

$$\begin{cases} r_{ij}=\dfrac{D_{jk}}{D_{ik}+D_{jk}} \\ r_{ji}=1-r_{ij} \end{cases}$$

初级生产估算模型

Sala O E, Biondini M E, Lauenroth W K：初级生产估算的偏好——一个分析解法．Ecological Modelling, 1988, 44

(1) 净初级生产的分布函数(NPP)：

定义 B_1 和 B_2 为时间 1 和 2 的生物量，作为与样本误差有关的随机变量，假定：

$$D=(B_2-B_1)\backsim N[\mu=\mu_2-\mu_1],$$
$$\sigma=\sqrt{\sigma_1^2+\sigma_2^2-Cov(B_1,B_2)}$$

则 NPP 为：

$$NPP=\begin{cases}0 & (B_2-B_1)\leqslant 0\\ B_2-B_1 & (B_2-B_1)\leqslant 0\end{cases}$$

$$F_{\mathrm{NPP}}(NPP)=q+pG_{NPP}(NPP)$$

式中，$G_{\mathrm{CNPP}}(NPP)=\dfrac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma p}\displaystyle\int_0^{NPP}e^{-\frac{1}{2}((x-\mu)\sigma)^2}\mathrm{d}x$；$p=P[D>0]$；$q=1-p$。

(2) NPP（$E(NPP)$）估算值的平均值和它的变化($Var(NPP)$)可表达为：

$$E(NPP)=p\mu+\frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}(\mu\cdot\sigma)^2}$$

$$\mathrm{Var}(NPP)=p\mu^2(1-p)+p\sigma^2+\frac{\mu\sigma}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}(\mu/\sigma)^2}(1-2p)-\frac{\sigma^2}{2\pi}e^{-(\mu\cdot\sigma)^2}$$

(3) $E(NPP)$ 和 μ 的差被称为估计过高的误差(OE)：

$$OE=\frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}(\mu\cdot\sigma)^2}-q\mu$$

Holling-Ⅲ型功能反应新模型

汪世泽、夏楚贵：Holling-Ⅲ型功能反应新模型．生态学杂志，1988，7(1)

或
$$N_a=aP\exp\left(-bP^{1-m}N^{-1}\right)$$
$$N_a=A\exp\left(-BN^{-1}\right)$$

斐波纳契搜索模型的目标函数

Vardavas I M：模型参数选择的斐波纳契搜索技术．Ecological Modelling, 1989, 48

(1) 如果系统输出剖面是高度不规则的，目标函数可能取 chi-平方统计量：

$$f(x)=\chi^2=(1/J_d)\sum_{j=1}^{J}(H_{j0}-H_j)^2/E^2$$

式中，J 为测量值；$J_d=J-M$ 表示 M-参数模型的自由度；H_{j0} 是测量 j 初始值；H_j 是模型的输出响应，它是 x 的函数；E 是测量 H_{j0} 的误差。当 $\chi^2<1$ 则模型和系统输出之间的差异和输出测量的误差是一样大的。

(2) 如果系统输出是非常不规则的，而输出测量误差不知道或者不予重视，那么我们可以使用理论上的 chi-平方统计量，即：

$$f(x)=\chi^2=(1/J_d)\sum_{j=1}^{J}(H_{j0}-H_j)^2/H_{j0}$$

式中，如果 $\chi^2<1$，则模型和系统输出之间的一致性至少在统计学上是有意义的。

死亡密度函数

杨凤翔：生命表的进一步研究及应用．生态学杂志，1989，8(5)

$$f(t)=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{P(t<T\leqslant t+\Delta t)}{\Delta t}$$

式中，$f(t)$为死亡密度函数；t 为发育期；T 为存活期，取值范围为$[0,\infty]$上的连续随机变量；Δt 为发育期的变化率。

岛屿生物地理学理论模型

邬建国：自然保护区学说与麦克阿瑟-威尔逊理论．生态学报，1990，10(2)

(1) 种丰富度模型：

$$S=CA^Z$$

式中，A 为面积；C、Z 均为拟合常数。

(2) M-W 学说：

$$\frac{\mathrm{d}s(t)}{\mathrm{d}t}=I-E$$

式中，$I(S,D)=\left(1-\frac{S}{S_p}\right)^{2n}\exp\left(1-\frac{\sqrt{D}}{D_0}\right)$ 为迁入率；$E(S,A)=\frac{RS^n}{A}$ 为灭绝率；S_p 为大陆种库大小；D 为岛屿与大陆库间距离；D_0，n 和 R 均为拟合参数。

地面辐射平衡方程

张嵩午：小麦群体的第二热源及其增温效应．生态学杂志，1990，9(2)

$$R=(S'+D)(1-\alpha)-(E_g-\delta E_A)$$

式中，R 为辐射差额；$S'+D$ 为到达地面的太阳总辐射；α 为地面对太阳辐射的反射率；E_g 地面放出的长波辐射；δE_A 为大气逆辐射被地面吸收的部分。

关于 Taylor 幂法则的统计学模型

沈佐锐：关于 Taylor 幂法则的统计学讨论．生态学杂志，1990，9(6)

(1) 幂法则——种群的空间分布模型：

$$S^2=a\bar{x}^b$$

式中，$\bar{x}$ 为种群密度；S^2 为相应的方差。

(2) 序贯抽样公式：

$$\begin{cases}T_0(n)=n\bar{x}_t-t\sqrt{an\bar{x}_t^b}\\T_1(n)=n\bar{x}_t+t\sqrt{an\bar{x}_t^b}\end{cases}$$

式中，$\bar{x}_t$ 为防治指标或受害程度指标；n 为累积的抽样数；t 为所取的学生氏 t 分布的临界值；$T_0(n)$ 和 $T_1(n)$ 为抽样结论的判据。

池塘能流模型

贺伟建，黄贯虹：介绍一种建立池塘能流模型的方法．生态学杂志，1991，10(3)

(1) 生态系统状态模型：

$$\begin{cases}\dot{Q}_1=K_1Q_1-K_2Q_2Q_1-K_3Q_3Q_1\\\dot{Q}_2=K_2Q_1Q_2+K_4Q_3Q_2-K_6Q_2\\\dot{Q}_3=K_7Q_3+K_3Q_1Q_3-K_4Q_2Q_3\\\dot{Q}_4=(K_{水}-K_{渣})Q_4\end{cases}$$

(2) 系统输出模型：

$$\begin{cases}-K_8+K_3Q_1+K_5Q_2=0\\K_9Q_3+K_{10}Q_1+K_{11}Q_2-K_{12}=0\end{cases}$$

式中，Q_1 为生产者所有能储存的能量；Q_2 为消费者所有能储存的能量，Q_3 为水中储存的能量；Q_4 为沉渣中所储藏的能量；k_1~k_{12} 均为系统的增益系数，其中 k_7、k_8 和 k_{12} 随输入变化而变化，其余参数在特定条件下可被认为是常数。

生态场理论模型

王德利：生态场理论——物理生态学的生长点．生态学杂志，1991，10(6)

(1) 生态势 $\phi(r)$ 模型：

$$\phi(r)=1-\frac{BINH}{N(\lambda_{21}+H+I(1+H))+IH}$$

(2) 生态场强度 I 模型：

$$I=\frac{R_{arg}}{R_{prg}}$$

式中，R_{arg} 为实际叶面积相对增长速率；R_{prg} 为潜在叶面积相对增长速率。

精细刻画函数与粗糙刻画函数的转化模型

Rastetter E B, King A W, Cosby B J et al：由对集合的精细刻画的生态学知识到模拟粗糙刻画的生态系统属性．Ecological Applications, 1992,2(1)

(1) 将精细刻画的函数转化成粗糙刻画的函数的一种方法是使用一个概率密度函数来定量化精细刻画的每个组成部分中的变量，并且使用统计期望算子来驱动集合体的被期望行为：

$$F=E[f(X)]=\int_{-\infty}^{+\infty}f(x)\rho(x)\mathrm{d}x$$

式中，F 是集合的、粗糙刻画的关系式（例如，整个树冠的光合作用方程）；$f(x)$ 是一个精细刻画的关系式（例如：单片叶子的光合作用方程）；x 是精细刻画的关系式中的某个变量，它在每个组成部分中是各不相同的；$\rho(x)$ 是一个概率密度函数，用来描述在精细刻画的每个组成部分中 x 是如何分布的。

(2) 已知每个单位面积的光合作用率，单片叶子可以被模拟为：

$$P=\frac{P_mE_0I}{P_m+E_0I}$$

式中，P_m 是叶子单位面积上最大的光合作用率；E_0 是光的利用率；I 是叶片上的光辐射量。

结果意味着叶片单位面积的光合作用率（$\overline{P}_{EI}$）

是可表达为：

$$\overline{P}_{I\,I} = \frac{P_m}{kL_0\Delta E_0}\left(\frac{P_m}{I_1}\ln\frac{P_m - E_{02}I_T}{P_m - E_{01}I_1} - \frac{P_m}{I_1 e^{-kL_0}}\ln\frac{P_m - E_{02}I_T e^{-kL_0}}{P_m - E_{01}I_T e^{-kL_0}} + E_{02}\ln\frac{P_m + E_{02}I_1}{P_m - E_{02}I_1 e^{-kL_0}} - E_{01}\ln\frac{P_m + E_{01}I_1}{P_m - E_{01}I_1 e^{-kL_0}}\right)$$

式中，k 是比尔定律的消光系数；L_0 是树冠底部在地面投影的单位面积上积累的覆盖叶片面积；假定叶片中光使用效率的分布依赖于光辐射量和光照均一性，它的值在 E_{01} 和 E_{02} 之间，则 $\Delta E_0 = E_{02} - E_{01}$；$I_1$ 是树冠顶部的光辐射量。

生物学变量的响应模型

Chen J, Franklin J F, Spies T A：原生道格拉斯冷杉林地区植物对边缘生境的反应 Ecological Applications, 1992, 2(4)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 e^{-\beta_2 X} + \varepsilon$$

$$Y = \beta_0 e^{-\beta_1 X} + \varepsilon$$

$$Y = \frac{\beta_0}{1 + \beta_1 e^{-\beta_2 X}} + \varepsilon$$

式中，Y 是对生物学变量的响应；X 是从边界到内部森林的距离；β_0，β_1 和 β_2 是衰退系数；ε 随机误差项。

研究中，用梯度上的点来计算边界深度影响，且在这一点上，已知项 Y 已经回归到能够代表 2/3 的内部森林生境的状态，即：

$$Y = Y_0 \pm \frac{2}{3}\left|Y_0 - Y_{240}\right|$$

式中，Y_0 和 Y_{240} 是边界上和深入到森林内部 240 m 处森林植被的响应。

捕食者-被捕食者模型

Grimm V, Schmidt E, Wissel C：稳定性概念在生态学的应用 Ecological Modelling, 1992, 63

(1) 简单的 Lotka-Volterra 类型的捕食者-被捕食者模型：

$$\frac{dN_1}{dt} = rN_1\left(1 - \frac{N_1}{K}\right) - fN_1N_2$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -gN_2 + wfN_1N_2$$

式中，N_1 表示被捕食者的数量；N_2 表示捕食者的数量；K 是捕食能力；r 是被捕食者的固有增长率；f 是捕食率；w 是一个捕食者通过吃一个被捕食者而获得的繁殖收益的量度。

(2) 两个参数的组合从总体上决定了系统的行为和结果可分别表达为：

$$\beta = \frac{g}{r}$$

$$\sigma = \frac{wfK - g}{r}$$

式中，β 表示捕食者单食性行为的程度(单食性捕食者有较高的 β 值)；σ 表示在捕食者和被捕食者生长发育的典型时间刻度之间的关系(高的 σ 值意味着捕食者种群的生长比被捕食者种群要快得多)。

生物稳定塘平衡方程

文湘华，钱易，顾夏声：生物稳定塘碳、氮、磷物质迁移转化模型的研究 生态学报，1992，12(3)

$$V\frac{dc}{dt} = QC_i - Q_eC - V\sum_{i=1}^{n}(v_c)_i$$

式中，C 为生物稳定塘中某一组分的浓度；$\frac{dc}{dt}$ 为生物稳定塘种某一组分的变化率；V 为反应器容积；Q 为进水流量；C_i 为某组分的进水浓度；v_c 为某组分的容积反应速率；n 为某组分参加反应的次数；Q_e 为出水流量。

主要优势植物分解速率和损失率的计算模型

郭继勋，祝廷成：羊草草原枯枝落叶分解的研究 主要优势植物的分解速率和损失率 生态学报，1992，12(4)

(1) 分解速率和损失率：

1) 分解速率模型：

$$r = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1}$$

式中，W_1 为枯枝落叶在 t_1 时的重量；W_2 为 t_2 时的重量；r 为分解速率，负值表示每天每克枯枝落叶消失的重量。

2) 损失率模型：

$$g = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$$

3) 损失率季节变化动态模型：

$$g = \frac{K}{1 + e^{a - bt}}$$

式中，K 为一年内损失率的极限值；a、b 为参数。不同植物枯枝落叶的 K、a、b 的值不同。

(2) 枯枝落叶分解的指数衰减模型：

Olson 指数衰减模型：

$$W_c = W_0 e^{-kt}$$

式中，W_0 为 $t=0$ 时枯枝落叶初始量；W_c 为 t 时刻的残留量；k 为年分解速率。

^{89}Sr-Sr 在田表水、表土及水稻植株种滞留浓度与时间的关系模型

王寿祥，张水熙，胡秉民等：锶-89 在模拟水稻田中的动力学行为. 生态学报，1992，12(4)

$$\hat{C}_w = 0.865e^{-0.028t} + 7.635e^{-0.470t}$$

$$\hat{C}_s = 35.142(e^{-0.028t} - e^{-0.470t})$$

$$\hat{C}_r = 35.182 - 23.481e^{-0.028t} - 11.701e^{-0.470t}$$

式中，$\hat{C}_w$ 为田表水中 ^{89}Sr-Sr 的滞留浓度；$\hat{C}_s$ 为 ^{89}Sr-Sr 在表土中的滞留浓度；$\hat{C}_r$ 为 ^{89}Sr-Sr 在水稻植株中的滞留浓度；t 为以上各和滞留浓度相应的滞留时间。

水分胁迫积分(WSI)模型

Mitchell R J, Zutter B R, Green T H et al：对于土壤湿度和松树反应的竞争性影响的空间和时间变化. Ecological Applications, 1993, 3(1)

$$\mathrm{WSI} = \sum_{i=0}^{i=t}[\Psi_{(i,i+1)} - C]N$$

式中，$\Psi_{(i,i+1)}$ 是对于任意时间间隔 $(i,i+1)$，平均黎明前的水分潜能；C 是整个研究期间测得的最大黎明前的水分潜能；N 是一个时间间隔内包括的天数。

森林渐近特征估算模型

Zhang L, Moore J A：基于生物数学基本原理，估算森林渐近特征. Ecological Applications,1993, 3(4)

(1) 在平均的树体积和树密度之间的竞争密度关系能通过 C-D 效应的倒数方程来表达：

$$\frac{1}{V} = AN + B$$

$$A = \frac{1-e^{-\lambda t}}{Y_x}$$

$$B = \frac{e^{-\lambda t}}{V_0}$$

式中，λ 是系数；t 是时间；V_0 是初始的平均树体积；Y_x 是最终产量，可表达为 $Y_x = \frac{1}{a_1 \cdot \mathrm{T}H_x^2}$，$\mathrm{T}H_x$ 是渐近顶部的高度。

(2) 渐近基本面积是(BA_x)：

$$BA_x = \frac{Y_x}{F \cdot \mathrm{T}H_x}$$

式中，F 是站立形状因子，它被定义为剥去树皮的树木体积与有相同截面积和高度的圆柱体体积的比率。

(3) 渐近的树密度(N_x)：

$$N_x = e^{\frac{(C-\lg Y_x)}{0.5}}$$

式中，C 是常数。

(4) 渐进树体积（V_x）：

$$\lg V_x = C - 1.5 \cdot \lg N_x$$

模拟的效果指数

Mayer D G, Butler D G：统计学验证. Ecological Modelling, 1993, 68

一个直接把模型预测值和观测数据关联起来的无量纲统计量称为模拟的效果(EF)，可定义为：

$$\mathrm{EF} = 1 - \sum(y_i - \hat{y}_i)^2 / \sum(y_i - \bar{y})^2$$

式中，y_i 表示观测值；$\hat{y}_i$ 表示模拟值；$\bar{y}$ 是观测值的平均值。

比较模型中预测值的验证模型

Power M：生态和环境模型预测值的验证. Ecological Modelling, 1993, 68

(1) 对于比较可供选择的各种模型的特别有用的统计量是 Theil 的不等式系数：

$$U^2 = \frac{\sum_{t=1}^{m}(M_{n+t} - S_{n+t})^2}{\sum_{t=1}^{m} S_{n+t}^{\ 2}}$$

式中，M_{n+t} 和 S_{n+t} 分别是系统的预测值和实际值。

(2) 偏向部分 U_{B}：

$$U_{\mathrm{B}} = \frac{(\overline{M} - \overline{S})^2}{\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{m}(M_{n+t} - S_{n+t})^2}$$

式中，$\overline{M}$ 和 $\overline{S}$ 是在观测值范围 $n+1$ 到 m 中，预测值和实际数据序列的平均值。

(3) 变化部分U_v：

$$U_V=\frac{(S_M-S_S)^2}{\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{m}(M_{n+t}-S_{n+t})^2}$$

式中，S_M和S_S是在观测值范围$n+1$到m中，预测值和实际数据序列的标准差。

(4) 协方差部分U_c：

$$U_c=\frac{2(1-r_{MS})s_M s_S}{\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{m}(M_{n+t}-S_{n+t})^2}$$

式中，r_{MS}是在观测值范围$n+1$到m中，预测值和实际数据序列的相关系数。

(5) Janus 商(J)是一个对模型预测精确性的有用的测度，它也能指示模型结构是否需要改变，可表达为：

$$J^2=\frac{\sum_{t=1}^{m}(M_{n+t}-S_{n+t})^2/m}{\sum_{t=1}^{n}(M_t-S_t)^2/n}$$

降维的生态梯度轴模型

颜万春，王维胜，李斌等：生态梯度轴(EGA)用于林木生态遗传的研究——CA方法估算$EGA(CA_1)$和$EGA(r^2)$。生态学报，1993，13(2)

(1) $EGA(CA_1)$模型：

$$dz=\sqrt{dx^2+dy^2}$$

式中，dz为生态梯度轴坐标。

(2) $EGA(r^2)$模型：

$$\hat{W}=h_{(i)}^2\tilde{x}(+d_0)$$

式中，$h_{(i)}^2=\sum_{j=1}^{q}|r_{ij}|^2$为系数矩阵，其中$q$为公共因子数；$\tilde{x}$为$x$标准化阵；$d_0$为标准化后的$y$；$\hat{W}$为生态梯度轴值

生物量回归模型

李意德：海南岛热带山地雨林临分生物量估测方法比较分析 生态学报，1993，13(4)

$$W=\sum N_i W_i$$

式中，N_i为第i径级的株数；W_i为第i径级的平均单株生物量。

改进的生态位分离测度模型

余世孝，L. 奥罗西：生态位分离的涵义与测度 植物生态学与地植物学学报，1993，17(3)

(1) 生态位分离S_{hi}模型：

$$S_{hi}=\sum_{j=1}^{k}D_j\left|P_{hj}-P_{ij}\right|$$

式中，P_{hj}，P_{ij}分别为物种h和i在中点坐标为$(X_{1j},X_{2j},\cdots,X_{\mu j},\cdots,X_{nj})$的第$j$个子空间的分布比例量；$X_{\mu j}$为第$j$个子空间中点在第$\mu$个资源维上的坐标；$D_j$为第$j$个子空间中点到生态为空间中一指定点$O$的距离。

(2) 不同梯度数目对生态位分离测度值的影响ρ_{hi}模型：

$$\rho_{hi}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{S_{jhi}-\bar{S}_{hi}}{\bar{S}_{hi}}\right)}$$

式中，ρ_{hi}为t种分割情况下物种h和i生态位分离测度的偏差值；S_{jhi}为物种h与i在第j种分割情况下的生态位分离值；$\bar{S}_{hi}$为t种情况下S_{jhi}的平均值。

大气沉积过程的沉积速度

Lovett G M：北美营养物和污染物的大气沉积——一种生态学观点，Ecological Applications, 1994, 4(4)

$$v_d=R_t^{-1}=\frac{1}{R_a+R_b+R_c}$$

式中，R_t是总的阻力，它是三组阻力的总和；R_a，R_b和R_c分别是crow空间中空气运动的阻力(由边界层到表层的传输)、表层本身的化学和生物学的吸收能力。

资源消耗的生态价值系数评估模型

李德虎，李顺祺：资源物理学及资源消耗的生态价值系数评估，自然资源学报，1994，9(1)

先定义破坏系数x_{iK}为人类活动消耗的第i个有用产品的量δ_{mi}与废物侵蚀性组分K的㶲B_K之比：

$$x_{iK}=\delta_{mi}/B_K \tag{1}$$

再定义破坏系数Y_{SK}为消耗的自然资源的第S个组分的㶲δB_S与废物侵蚀性组分K的㶲B_K之比：

$$Y_{SK}=\delta B_S/B_K \tag{2}$$

式中，破坏系数 x_{iK} 和 Y_{SK} 取决于废物源的位置和侵蚀性组分的浓度。通常只需考虑废物侵蚀性组分 K 的化学烟，但当物理烟对环境也有破坏作用时(如废热引起的热污染)，则物理烟也要被考虑进去。

自然资源的消耗(烟消耗)可以用生态价值系数表示。下面方程表示在最后的生产步骤中，生产第 j 个过程的单位主产品(用 ρ_j 表示)，第 k 个自然资源的生态价值系数的平衡：

$$\rho_j + \sum_i f_{ij}\rho_i = \sum_i a_{ij}\rho_i + \sum_s B_{sj} + \sum\sum B_{kj}X_{ik}\rho_i + \sum_k\sum_s B_{kj}y_{sk} \quad (3)$$

或

$$\rho_j + \sum_i \left(f_{ij} - a_{ij} - \sum B_{kj}X_{ik}\right)\rho_i = \sum_s \left(B_{sj} + \sum_s B_{kj}y_{sk}\right) \quad (4)$$

式中，B_{sj} 为生产单位主产品，在所考虑的过程中直接消耗的第 S 个自然资源的烟；B_{kj} 为生产单位第 j 个主产品，废物的第 k 个侵蚀组分的烟；f_{ij} 和 a_{ij} 分别为在生产的最后过程中，第 j 个单位产品的第 i 个中间产品的副产品系数和消耗系数。

引入辅助系数：

$$h_{ij} = \sum_k B_{kj}x_{ik} \quad (5)$$

$$g_{sj} = \sum_k B_{kj}Y_{sk} \quad (6)$$

或用矩阵形式：

$$\overline{H} = \overline{X}\,\overline{K} \quad (7)$$

$$\overline{G} = \overline{Y}\,\overline{K} \quad (8)$$

式中，$\overline{X}$、$\overline{Y}$ 和 $\overline{K}$ 分别为系数 x_{iK}，Y_{SK} 和 B_{kj} 的三角矩阵，则方程(3)就可以写成：

$$\rho_j - \sum_i \left(a_{ij} + h_{ij} - f_{ij}\right) = \sum_s \left(B_{sj} + g_{sj}\right) \quad (9)$$

或用矩阵表示为：

$$\overline{\rho}^T\left(\overline{E} - \overline{A} + \overline{F} - \overline{XF}\right) = \overline{E}_R\left(\overline{S} + \overline{YK}\right) \quad (10)$$

式中，$\overline{S}$ 为量 B_{sj} 的三角矩阵；$\overline{E}_R$ 为具有 S 个元素的单位矢量阵；$\overline{\rho}^T$ 为量 ρ_c 的向量矢量；$\overline{E}$ 为单位阵；$\overline{F}$、$\overline{A}$ 为系数 f_{ij} 和 a_{ij} 的平方阵。

从方程(10)可以得出：

$$\overline{\rho}^T = \overline{E}_R\left(\overline{S} + \overline{YK}\right)\left(\overline{E} - \overline{A} + \overline{F} - \overline{XK}\right)^{-1} \quad (11)$$

土壤水平衡、氮行为和生物量组分的模拟

Schultz A, Mirschel W：使用农业生态系统模型 AGROSIM WinterWheat 和德国北部 Krummbach 集水盆地数据来模拟土壤水平衡、氮行为和生物量组成. Ecological Modelling, 1995, 81

(1) 通过 Wendling et al. (1991)公式计算每天潜在土壤水分蒸发蒸腾损失总量（PET）：

$$\mathrm{PET} = \frac{(Q_{\mathrm{GLC}} + c)(T_{\mathrm{MED}} + 22.0)}{150.0(T_{\mathrm{MED}} + 123.0)}$$

式中，Q_{GLC} 是每天全球辐射总量；T_{MED} 是每日平均温度，c 是表示研究区大概地理位置的常数。

(2) 氮行为：

每天 t 在根土层的土壤矿质氮含量 NS(t)（单位 $\mathrm{g \cdot m^{-2}}$）计算为：

$$\mathrm{NS}(t) = \mathrm{NS}(t-1) + \mathrm{NM}_{0\sim60}(t) + \mathrm{FE}(t) + \mathrm{NDD}(t) + \mathrm{NDW}(t) - \mathrm{NU}(t) - \mathrm{NL}(t)$$

式中，$\mathrm{NM}_{0\text{-}60}(a)[\mathrm{gN \cdot (m^{-2} \cdot d^{-1})}]$ 是在第 t 天 0~60 cm 土层中的矿化氮；FE(t)($\mathrm{g\,N \cdot m^{-2}}$) 是肥力；NDD($t$) 和 NDW($t$)（$\mathrm{g \cdot N \cdot m^{-2}}$）分别是干燥和潮湿大气中氮的沉积作用；$N_U(t)$($\mathrm{g\,N \cdot m^{-2}}$)是被农作物吸收的氮；$N_L(t)$($\mathrm{g \cdot N \cdot m^{-2}}$)是根部氮的滤出；$\mathrm{NM}_{0\sim60}(t) = (\mathrm{WS}_{0\sim60}(t)P \cdot 10^Q)/\mathrm{WS}_{\mathrm{FC},0\text{-}60}$，$Q = 6.865 - [2785/(\mathrm{TS}_{0\sim60}(t) + 273)]$，$\mathrm{WS}_{0\text{-}60}(t)$ (mm)是土壤水；$\mathrm{TS}_{0\text{-}60}(t)$（℃）是第 t 天 0~60 cm 土层平均土壤温度，$\mathrm{WS}_{\mathrm{FC},0\text{-}60}$ (mm)是土地容量，P($\mathrm{g \cdot N \cdot m^{-2}}$)是 0~60 cm 土层的可用矿化潜力。

自相关指数的空间模型

Henebry G M：使用自相关指数的空间模型误差分析. Ecological Modelling, 1995, 82

(1) 空间自相关：

Moran 的 I 是一个指数，作为邻近滞后的函数，用来测量离散数据中空间自相关的强度，即：

$$I = \left(n\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} w_{ij}z_i z_j\right)\left(S_0\sum_{i=1}^{n} z_i^2\right)$$

式中，n 是区域单元的数目；w_{ij} 是空间权重；z 是与平均值的差距；S_0 是权重矩阵的总和

(2) 时空自相关——时空指数 (S_{TI})：

$$S_{TI}=(nT-n)\left(\sum_{t=2}^{T}\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{n}w_{i,j,t-1}z_{i,t}z_{j,t-1}\right)\times\left(\sum_{t=2}^{T}\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{n}w_{i,j,t-1}\sum_{t=2}^{T}\sum_{i=1}^{n}z_{it}^{2}\right)^{-1}$$

式中，n 是区域单元的数目；T 是时间单元的数目；$w_{i,j,t}$ 是时空权重；z 是与时空平均值的差距。

生态网络中物质、能量流动的时间链分析模型

钱涛平：生态网络中物质、能量流动的时间链分析．生态学报，1995，15(2)

(1) Markov 链模型：

$$p_{ij}(k+1)=\sum_{l}p_{il}(h)p_{lj}(k-h)$$

矩阵形式为：

$$P(k)=P(h)P(k-h)$$

式中，$p_{ij}(k)$ 为由 i 经过 k 到达 j 的转移概率；$P(k)$ 为相应的转移矩阵；i 和 j 为两个分室；P_{ij} 为物质或能量由分室 i 到达分室 j 的概率。

(2) 生物网络中物质、能量流动的时间链：

1) 某一时间微段 ds 上输入的物质、能量在网络中流动的时间链，可表达为：

$$V_{0}^{e}(t_k)=V_{0}^{e}(t_0)P_{0}^{e}(t_0)P_{0}^{e}(t_1)\cdots P_{0}^{e}(t_{k-1})$$

对于稳定生态网，则有：

$$V_{0}^{e}(t_k)=V_{0}^{e}(t_0)[P_{0}^{e}(t_0)]^{k}$$

式中，$V_0^e(t_0)$ 为时间微段 $(t_0,t_0+\mathrm{d}s)$ 上源分室的能量输出向量；$P_0^e(t_0)$ 为此时的一步转移矩阵；$t_{i+1}=t_k+\Delta t$，$V_0^e(t_k)$ 为 $V_0^e(t_0)$ 时刻 t_k 时在生态网络中的分布向量。如果将上述参数中的上标 e 换成 m，就可以获得生态网络中物质流动的时间链。

2) 一定时间长度 L 上输入的物质、能量在网络中流动的时间链：

$$\begin{cases}V^{e}(t_0,t,0)=\sum_{i=0}^{k}V_{i0}^{e}\\ V^{e}(t_0,t,\Delta t)=V^{e}(t_0,t,0)P^{e}(t)\\ V^{e}(t_0,t,\Delta t\times 2)=V^{e}(t_0,t,0)P^{e}(t+\Delta t)\\ \vdots\\ V^{e}(t_0,t,\Delta t\times k)=V^{e}(t_0,t,0)P^{e}(t+\Delta t(k-1))\end{cases}$$

对于稳定生态网络，则有：

$$V^{e}(t_0,t,\Delta tk)=V^{e}(t_0,t,0)[P^{e}(t)]^{k-1}$$

式中，$V^e(t_0,t,\Delta t)$ 为时间段 $L=t-t_0$ 上，输入的能量 $t+\Delta t$ 时刻在生态网中的分布向量；$P^e(t)$ 为时刻 t 室能量在生态网中的转移矩阵。如果将上述参数中的上标 e 换成 m，就可以获得生态网络中物质流动的时间链。

浮游生物季节变化的模拟模型

徐永福，Green JSA：模拟浮游生物的季节变化．生态学报，1995，15(3)

(1) 光合作用速率模型：

$$P_r=\frac{VBN\exp(-E_a/RT)I_0I_k^{-1}\exp(-\beta_2Z)}{(k_s+N)\left\{1+\left[I_0I_k^{-1}(-\beta_2Z)\right]^2\right\}^{1/2}}$$

式中，V 为具有单位 d^{-1} 的常数；B 为以 C 计，以 mg·m^{-3} 为单位的生物量浓度；N 为营养物浓度；E_a 为反应的活化能；R 为气体普通常数；T 为绝对温度；I_0 为表面光强；I_k 为光限制区的比例指数；Z 为海水深度；k_s 为半饱和浓度；β_2 为光衰减系数。

(2) 海洋生物学过程模型：

$$\frac{\mathrm{d}PY}{\mathrm{d}t}=\frac{V_xN_s}{k_s+N_s}PY-d_pPY-g_Z(1-e^{-\lambda PY})ZP-\frac{W_c}{H}PY$$

$$\frac{\mathrm{d}ZP}{\mathrm{d}t}=(1-f_c)g_Z(1-e^{-\lambda PY})ZP-d_ZZP-\frac{W_c}{H}ZP$$

$$\frac{\mathrm{d}N_s}{\mathrm{d}t}=-\frac{V_xN_s}{k_s+N_s}PY+f_pd_pPY+f_Zd_ZZP+f_cg_Z(1-e^{-\lambda PY})ZP-\frac{W_c}{H}(N_s-N_h)$$

式中，PY 为浮游植物；ZP 为浮游动物；N 为溶解营养物；V_x 为光合作用速率在混合层的垂直积分；N_s，N_h 分别为混合层内及混合层底部的硝酸根浓度；d_Z，d_P 分别为浮游动物及浮游植物的死亡速率；g_Z 为浮游动物最大捕食速率；f_c 为未同化的捕食分数；f_P，

f_z 分别为死浮游植物和死浮游动物的转化系数；A 为Ivlev 常数

多目标最佳可持续利用模型

郭中伟：生物资源的多目标最佳可持续利用. 自然资源学报，1995，10(4)

令：B 为生物资源的种群密度，$F_{ci}(i=1,2,\cdots,n)$ 为一组表明环境、生物、经济和社会状况的变量；$Q_j(F_{ci})(i=1,2,\cdots,n)(j=1,2,\cdots,m)$ 为一组函数，表明生物种群对环境、生物、经济和社会状况的影响，并且 $u(t)$ 为收获率。收获时间的区间是 $[0,t_f]$，生物持续约束为 $B(t_f)\geqslant b$；利益约束为 $F_{ci}(t_f)\geqslant F_{cif}$，并且收获率约束为 $0\leqslant u\leqslant u_{max}$，其中 b、F_{cif} 和 u_{max} 均是正常数。根据以上假设条件和分析，多目标最佳持续收获的数学表达式如下：

系统状态：

$$\mathrm{d}B/\mathrm{d}t = rB(1-B/K)-u$$

$$\mathrm{d}F_{ci}/\mathrm{d}t = Q_j(F_{ci})$$

$$(i=1,2,\cdots,n;\quad j=1,2,\cdots,m)$$

初值：$B(0)=B_0$，$F_{ci}(0)=F_{ci0}$

终态：$F_{ci}(t_f)\geqslant F_{cif}$，$B(t_f)\geqslant b$

约束：$0\leqslant u\leqslant u_{max}$

目标：$J=\min-G\left[t_f,F_{ci}(t_f)-\int_0^{t_f}L(B,u)\mathrm{d}t\right]$

式中，r 和 K 是正常数；G 和 L 为标量函数。为了直接使用标准的最优控制问题形式，式中，将极大问题转换成极小问题。

Bap 传输数学模型

李书鼎，张少兰，马吉春：苯并[a]芘在土壤-水-水稻系统中传输动力学研究. 生态学报，1995，15(4)

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}q_1(t)}{\mathrm{d}t}=K_{12}q_2(t)+K_{13}q_3(t)-(K_{21}+K_{31})q_1(t)\\ \dfrac{\mathrm{d}q_2(t)}{\mathrm{d}t}=K_{21}q_1(t)+K_{23}q_3(t)-(K_{12}+K_{32})q_2(t)\\ \dfrac{\mathrm{d}q_3(t)}{\mathrm{d}t}=K_{31}q_1(t)+K_{32}q_2(t)-(K_{23}+K_{13})q_3(t)\end{cases}$$

式中，$q_i(t)$ 为第 i 室 $^{14}C-BaP$ 在 t 时刻的数量(或浓度)；K_{ij} 为从 j 室传输到 i 室的 $^{14}C-BaP$ 得速度常数。

灵敏性和种别性的统计计算模型

Murtaugh P A：生态指数的统计计算. Ecological Applications, 1996, 6(1)

Y 是一个随机变量，在 0 和 1 中取值，分别表示负面的和正面的反应；X 是一个连续随机变量，是利益的指示者或制造者。如果 X 的值大于某个界限值 c，那么我们将推测那个单元中 $Y=1$；如果 $X\leqslant c$，我们将推测 $Y=0$。定义如下：

$$F(c)\equiv P(X\leqslant c\mid Y=0)$$

$$G(c)\equiv P(X\leqslant c\mid Y=1)$$

灵敏性 $\equiv H(c)=P(X>c\mid Y=1)=1-G(c)$

种别性 $\equiv P(X\leqslant c\mid Y=1)=F(c)$

负面的预测值(PPV)：

$$\mathrm{PPV}=P(Y=1\mid X>c)=\frac{H(c)p_y}{H(c)p_y+[1-F(c)](1-p_y)}$$

正面的预测值（NPV）：

$$\mathrm{NPV}=P(Y=0\mid X\leqslant c)=\frac{F(c)(1-p_y)}{F(c)(1-p_y)+[1-H(c)]p_y}$$

式中，$p_y=P(Y=1)$ 是利益响应的潜在流行性。

信息碎片的维度计算模型

Loehle C，Li B L：生态学和地质学中不规则碎片的统计学特性. Ecological Modelling, 1996, 85

(1) 已知位置和尺度的概率函数，则信息碎片的维度可 D_I 定义为：

$$D_I=\lim_{\varepsilon\to 0}\frac{\sum_{i=1}^{\infty}P_i(\varepsilon)\lg P_i(\varepsilon)}{\lg(1/\varepsilon)}$$

式中，$P_i(\varepsilon)$ 是已知尺度 ε 的相对强度。

(2) 通过使用估计值 $d_i(\varepsilon)$，可以在尺度序列 ε 中直接计算信息碎片的维度 D_I，即：

$$d_i(\varepsilon)=\frac{\sum_{i=1}^{K(\varepsilon)}P_i(\varepsilon)\lg P_i(\varepsilon)-\sum_{j=1}^{K(\gamma)}P_j(\gamma)\lg P_j(\gamma)}{\lg(1/\varepsilon)-\lg(1/\gamma)}$$

式中，γ 是大于 ε 的下一个盒子样方的尺寸。

生态学中的逐步聚类模型

张峰，上官铁梁：逐步聚类法及其应用. 植物生态学报，1996，20(6)

(1) 目标函数 S 模型：

$$S = \sum_{i=1}^{m} n_i (\bar{x}_i - \bar{x})'(\bar{x}_i - \bar{x})$$

式中，n_i 为第 i 个样方组的样方数；$\bar{x}_i$ 为其均值；$\bar{x}$ 为 N 个样方的总均值；m 为 N 各样方所分的组数。

(2) 目标函数增量 $\Delta S_{pq}^{(i)}$ 模型：

$$\Delta S_{pq}^{(i)} = \frac{(C_p - \bar{x}_i)'(C_p - \bar{x}_i)}{n_p - 1} + \frac{(C_q - \bar{x}_i)'(C_q - \bar{x}_i)}{n_q + 1} - \frac{C_p' C_p}{n_p} - \frac{C_q' C_q}{n_q}$$

式中，C_p 和 C_q 分别为第 p、q 个样方组数值的列向量；n_p 和 n_q 分别为第 p、q 个样方组的样方数。

土壤微生物生物量的测定模型

郭继勋，祝廷成：羊草草原土壤微生物量的数量和生物量．生态学报，1997，17(1)

(1) 细菌生物量计算模型：

$$B = \frac{c}{b} N$$

式中，B 为生物量；c 为细菌纯培养悬液的总干重；b 为细菌纯培养悬液中的总数；N 为 1g 干土中的细菌总数。

(2) 放线菌和真菌生物量计算模型：

$$B = W_d l_2 \frac{10}{l_1} ds$$

式中，B 为生物量；W_d 为定量 5ml 悬液菌丝的总干重；l_1 为定量 5ml 悬液菌丝涂片的显微镜视野平均长度；l_2 为土壤稀释悬液菌丝涂片中菌丝的平均长度；ds 为干土百分比；10 为 50ml 稀释土样悬液与 5ml 菌丝悬液的比值。

空间分布型与时空相关模型

周国法：应用一维空间序列方法研究空间分布型与时空相关．生态学报，1997，17(2)

(1) 单种空间分布结构的分析：

单方向协方差函数 $C(K)$ 模型：

$$C(K) = \frac{1}{n-k} \sum_{j=1}^{n-k} (y_{j+k} - m')(y_k - m'')$$

$$m' = \frac{1}{n-k} \sum_{j=k+1}^{n} y_j$$

$$m'' = \frac{1}{n-k} \sum_{j=1}^{n-k} y_j$$

$$C(0) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} (y_j - m)^2$$

式中，m' 为首变量 y_{j+k} 的平均值；m'' 为尾变量 y_j 的平均值。

(2) 种间、种群与环境间的空间关系：

两种间的交叉协方差函数 $C_{xy}(k)$ 模型：

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n-k} \sum_{j=1}^{n-k} (y_{j+k} - m_y')(x_j - m_x'')$$

式中，m_y' 和 m_x'' 分别为首尾变量 y_{j+k} 和 x_j 的均值。

生态位的态势理论模型

朱春全：生态位态势理论与扩充假说．生态学报，1997，17(3)

(1) 生态位模型：

$$N_i = \frac{S_i + A_i P_i}{\sum_{j=1}^{n} (S_j + A_j P_j)} \quad (i, j = 1, 2, \cdots, n)$$

式中，N_i 为生物单元 i 的生态位；S_i 和 S_j 分别为生态单元 i、j 的态；P_i 和 P_j 分别为生态单元 i、j 的势；A_i 和 A_j 为量纲转换系数。

(2) 生态单元态的逻辑斯谛曲线模型：

$$\frac{dN}{dt} = r \frac{K - N}{K} N$$

式中，K 为环境容量；N 为生物生长的指标，即生物单元态的度量指标；r 为内禀增长率；t 为时间。

Meta 分析模型

彭少麟，唐小焱：Meta 分析及其在生态学上的应用．生态学杂志，1998，17(5)

(1) 固定效应及其方差模型：

$$d_{++}=\frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{K_i}W_{ij}d_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{K_i}W_{ij}}$$

$$S^2(d_{++})=\frac{1}{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{K_i}W_{ij}}$$

式中，d_{++}为总平均效应；$S^2(d_{++})$为总的平均方差；W_{ij}为用于联合效应大小的权重，是取样方差的倒数；K_i为第i级别中研究的数量。

(2) 混合模型：

$$d_{++}^{*}=\frac{\sum_{i=1}^{m}W_{i+}^{*}d_{i+}^{*}}{\sum_{i=1}^{m}W_{i+}^{*}}$$

$$S^2(d_{++}^{*})=\frac{1}{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{K_i}W_{j_i}^{*}}$$

式中，d_{++}^{*}为总积累效应；$S^2(d_{++}^{*})$为其方差。

植物种群与群落结构动态分析模型

陈晓德：植物种群与群落结构动态量化分析方法研究，生态学报，1998，18(2)

(1) 植物种群年龄结构的数量变化动态分析：
整个种群年龄结构的动态量值(V_{pi})模型：

$$V_{pi}=\frac{1}{\sum_{n=1}^{K-1}S_n}\cdot\sum_{n=1}^{K-1}(S_nV_n)$$

$$V_n=\frac{S_n-S_{n+1}}{\max(S_n,S_{n+1})}100\%$$

式中，S_n和S_{n+1}分别为第n与第$n+1$年龄级种群个体数；K为最大年龄级；V_n为种群内量相邻级间个体数量变化动态。

(2) 植物群落结构动态(V_c)的量化分析方法
植物群落结构动态V_c模型：

$$V_c=\frac{1}{j-\sum_{i=1}^{L}M_i+L}V_{p1}V_{p2}\cdots V_{pj}$$

上式条件为：群落j个优势种中存在着L个达到共生关系的种间联结组合，每个组合具有M_i个种。

绿洲水热平衡-实际蒸散模型

蒙吉军：水资源：绿洲生态平衡的关键——张掖绿洲案例研究，资源科学，1998，20(6)

$$S=\sum S_i$$
$$S_i=0.18P/1.045^t$$
$$E_a=17.072(1.045^{T+t'}+1.045^{T-t'})$$
$$T'=\frac{\ln 0.18+\ln P-\ln S}{\ln 1.045}$$
$$R_t=29\times 1.045^{T'}$$
$$D=\frac{R_t}{L_p}$$

式中，S为湿润指数；S_i为月湿润指数；P为月降水量；t为月均温；E_a为S=6.37(即半湿润区中值条件)的实际蒸散；T为年均温；T'为综合性年温；R_t为年净辐射；L_p为潜热。

森林生态系统根系生物量的PFR模型

黄建辉，韩兴国，陈灵芝：森林生态系统根系生物量研究进展，生态学报，1999，19(2)

(1) 钻土芯法——细根生物量PFR模型：

$$PFR=\Delta B+\Delta N+\Delta D+\Delta G+\Delta S+\Delta R+\Delta E$$

式中，ΔB为具有统计意义的活根增量；ΔN为死根的增量；ΔD为采样间隔中的分解量；ΔG为采样间隔中被动物取食的量；ΔS为采样间隔中根表皮的脱落；ΔR为采样间隔中根的呼吸量；ΔE为采样间隔中根的分泌。

(2) 平衡法——细根生物量PFR模型：

$$PFR=\frac{N_{fr}}{N_{conc}}$$

式中，N_{fr}为分配到细根中N量；N_{conc}为细根中N的平均浓度。

(3) 土壤碳平衡法——细根生物量PFR模型：

$$PFR=1.92P_a+130$$

式中，P_a为地上部分分解碎屑的输入。

FORCLIM的四个修正模型

Harald K. M. Bugmann, Allen M. Solomon：对跨生物地理区域的森林组成与生物量的解释，Ecological Applications, 2000, 10(1)

(1) 在FORCLIM V2.6中计算的干旱指标u_{Dr}：

$$u_{Dr} = 1 - \frac{\sum_m E_m}{\sum_m D_m}$$

式中，m表示月份；E_m是指树所蒸发的水量；D_m是它们对土壤水的蒸发需求。

该指数可修正为：

$$u_{Dr} = \begin{cases} 1 - \sum_{T_m > k} \frac{E_m}{D_m} & (\text{常绿植物}) \\ 1 - \sum_{\substack{(T_m > k) \wedge \\ m \in \{4, \cdots, 10\}}} \frac{E_m}{D_m} & (\text{落叶植物}) \end{cases}$$

式中，T_m是指m月的平均温度；k是临界温度。

(2) 在FORCLIM的早期版本中，夏季温度对树木的影响可用下面计算年度积温u_{DD}的公式进行模拟：

$$u_{DD} = \sum_{m=1}^{12}[\max(T_m - k, 0) \times k_{Days} + g_{Corr}(T_m)]$$

式中，T_m是月平均温；k_{Days}是指每个月的平均天数；g_{Corr}是一个经验函数，用以纠正在从月平均温估算月度生长温度时引起的偏差。

该公式可修正为：u_{DD}=

$$\begin{cases} \sum_{T_m > k}[\max(T_m - k, 0)k_{Days} + g_{Corr}(T_m)] & (\text{常绿植物}) \\ \sum_{\substack{T_m > k \\ m \in \{4, \cdots, 10\}}}[\max(T_m - k, 0)k_{Days} + g_{Corr}(T_m)] & (\text{落叶植物}) \end{cases}$$

(3) 在FORCLIM V2.6中，树木生长的温度反映函数(g_{DDGF_s})为：

$$g_{DDGF_s} = \max\left[\frac{4(u_{DD} - k_{DDMin_s})(k_{DDMax_s} - u_{DD})}{(k_{DDMax_s} - k_{DDMin_s})^2}, 0\right]$$

式中，k_{DDMax_s}是指最高温度的忍耐参数；k_{DDMin_s}是指最低温度的忍耐参数。

该公式可修正为：

$$g_{DDGF_s} = \max[1 - e^{(k_{DDMin_s} - u_{DD})a}, 0]$$

式中，a是一个描述曲面坡度的参数

(4) 在FORCLIM V2.6中，在冬季最低温度(u_{WiT})低于这个种的临界温度(k_{WiT_s})时，树的移植可免于冻死叶子和花蕾：

$$g_{DDGF_s} = \begin{cases} 1 & (k_{WiT_s} \leqslant u_{WiT}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$$

该公式可修正为：

$$g_{DDGF_s} = \begin{cases} 1 & (k_{WiTN_s} \leqslant u_{WiT} \leqslant k_{WiTX_s}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$$

式中，$k_{WiTN_s} \equiv k_{WiT_s}$，$k_{WiTX_s}$表示种$s$所能忍受的不致衰退的冬季最高温。

大尺度森林碳预算的误差分析模型

Phillips D L, Brown S L, Schroeder P E et al：大尺度森林碳预算的误差分析. Global Ecology and Biogeography, 2000, 9

(1) 在USDA森林清查和分析程序(FIA)中正在生长树干的当前体积的区域估算：

$$V = \sum_j \sum_i f_{ij} V_{ij}$$

式中，V_{ij}是当前正在生长树干的体积；下标i和j分别表示个体和州；f_{ij}是适当的区域扩展因子。

(2) 样本误差：

五个州区域的样本的总的体积差异：

$$\sigma^2_{V,s} = \sum_j \sigma^2_{V_j,s}$$

式中，$\sigma^2_{V_j,s}$是州j的州样本差异。

(3) 回归误差：

扩展区域体积估算的预测差异($\sigma^2_{f_{ij}V_{ij},r}$)：

$$\sigma^2_{f_{ij}V_{ij},r} = f_{ij}^2 \sigma^2_{V_{ij},r}$$

式中，$\sigma^2_{V_{ij},r}$是对当前正在生长树干的体积的个体预测误差的变化，i个体和j州的扩展区域总的正在生长树干的体积的区域回归误差变化，可表达为$\sigma^2_{V,r} = \sum_j \sum_i f_{ij}^2 \sigma^2_{V_{ij},r}$。

(4) 测量误差：

由于扩展到整个研究区的正在生长树干的体积测量误差引起的差异为：

$$\sigma^2_{V,m} = \sum_j \sum_i f_{ij}^2 (\sigma^2_{V_{ij},D_{ij}} + \sigma^2_{V_{ij},H_{ij}})$$

式中，$\sigma^2_{V_{ij},D_{ij}}$、$\sigma^2_{V_{ij},H_{ij}}$是对于高度H和$DBH(D)$的个体测量误差的差异。

(5) 总误差：

考虑到所有误差源的全部区域正在生长树干的体

积为:

$$\sigma_T^2 = \sigma_{T,s}^2 + \sigma_{T,r}^2 + \sigma_{T,m}^2$$

SPAC 水分热力学函数计算

吕家龙，张一平，刘思春等：施磷水平对 SPAC 水分能量特征的影响．生态学报，2000，20(2)

(1) 土壤水分热力学函数模型:

$$\Delta\overline{G}_{土} = -\overline{V}^o\tau$$

$$\Delta\overline{S}_{土} = -\overline{V}^o\frac{\partial\tau}{\partial T}$$

$$\Delta\overline{H}_{土} = \Delta\overline{G}_{土} + T\Delta\overline{S}_{土}$$

式中，$\Delta\overline{G}_{土}$ 为相对偏摩尔自由能；$\overline{V}^o$ 为纯水的偏摩尔体积；τ 为土壤吸水力；$\Delta\overline{S}_{土}$ 为相对偏摩尔熵；$\frac{\partial\tau}{\partial T}$ 为 τ ~T 线性方程斜率；T 为绝对温度。

(2) 植物叶片水分热力学函数模型:

$$\Delta\overline{G}_{叶} = -\overline{V}\cdot P$$

$$\Delta\overline{S}_{叶} = \overline{V}\frac{\partial P}{\partial T}$$

$$\Delta\overline{H}_{叶} = \Delta\overline{G}_{叶} + T\cdot\Delta\overline{S}_{叶}$$

式中，$\overline{V}$ 为叶片水分的偏摩尔体积；P 为小麦叶片水势测定的压力室读数。

(3) 大气水分热力学函数模型:

$$\psi_{W气} = \frac{RT}{\overline{V}^o}\ln\frac{P}{P^o}$$

$$\Delta\overline{G}_{气} = \overline{V}^o\tau$$

$$\Delta\overline{S}_{气} = \overline{V}^o\frac{\partial\tau}{\partial T}$$

$$\Delta\overline{H}_{气} = \Delta\overline{G}_{气} + T\cdot\Delta\overline{S}_{气}$$

式中，$\psi_{W气}$ 为淡大气水势；R 为气体常数；$\frac{P}{P^o}$ 为大气相对湿度

中国村级生态系统长期变化的统计分析模型

Ellis E C, Li R G, Yang L Z et al：用景观与统计方法来研究中国村级生态系统的长期变化．Ecological Applications, 2000, 10(4)

(1) 标准化反转变量权重 W_i:

$$W_i = \frac{\sigma_i^2}{\sum_{i=1}^{m}\sigma_i^2}$$

式中，σ_i 是第 i 个变量的方差；m 是估测对象的总数

(2) 输入系统的平均加权平均值:

$$M_{WA} = \sum_{i=1}^{n}\left(P_i\frac{\overline{X}_i}{\sum_{i=1}^{n}\overline{X}_i}\right)$$

式中，P_i 是系统的第 i 个变量；$\overline{X}_i$ 是第 i 个变量的平均值；n 要求和的变量的总数

生物指数的计算公式

王俊才，方志刚，鞠复华等：摇蚊幼虫分布及其与水质的关系．生态学杂志，2000，19(4)

$$生物指数 = \sum_{i=1}^{n}\frac{s_i n_i}{N}$$

式中，s_i 为每种动物相应的赋分值；n_i 为每种生物的个体数；n 为样品中生物种类数；N 为样品中生物总数。

生态地理区域系统界线划分的物元模型

张军涛，李哲，郑度：基于可拓工程方法的生态地理区域系统界线划分研究．地理学报，2001，56(1)

(1) 物元模型指标及其数值:

1) 计算干燥度指数公式:

$$D = f\,E_t/P$$

式中，E_t 为年或生长季的潜在蒸散量，潜在蒸散量的计算采用的是经过改进之后的彭曼模型，为了修正这一模型所得的数值在温带地区偏大的问题，在模型中增加了修正系数；P 为年或生长季的降水量；f 为随季节而变异的系数，11~2 月为 0.6，5~8 月为 0.8，其余各月为 0.7，全年平均为 0.75。

2) 经典域、节域和待识别物元的确定:

根据可拓集合理论，将区域自然景观变化的概念集合(半湿润—半干旱区)逐渐变化的关系，由定性描述扩展为定量描述，以便识别式中的层次关系。设 $P=\{半湿润—半干旱区\}$，$P_0=\{半干旱区\}$，则 $P\supset P_0$，对于任何 $p\in P$，试判断 p 是否属于 P_0，并计算 $p\in P_0$ 的程度。

经典域物元:

$$R_0=\begin{bmatrix} P_0 & c_1 & V_{01} \\ & c_2 & V_{02} \\ & c_3 & V_{03} \\ & c_4 & V_{04} \end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix} P_0 & c_1 & \langle a_{01},b_{01}\rangle \\ & c_2 & \langle a_{02},b_{02}\rangle \\ & c_3 & \langle a_{03},b_{03}\rangle \\ & c_4 & \langle a_{04},b_{04}\rangle \end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix} P_0 & c_1 & \langle 1.5,3.99\rangle \\ & c_2 & \langle 1.55,3.99\rangle \\ & c_3 & \langle -150,-350\rangle \\ & c_4 & \langle 400,250\rangle \end{bmatrix}，$$

节域物元：

$$R_p=\begin{bmatrix} P & c_1 & V_{p1} \\ & c_2 & V_{p2} \\ & c_3 & V_{p3} \\ & c_4 & V_{p4} \end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix} P & c_1 & \langle a_{p1},b_{p1}\rangle \\ & c_2 & \langle a_{p2},b_{p2}\rangle \\ & c_3 & \langle a_{p3},b_{p3}\rangle \\ & c_4 & \langle a_{p4},b_{p4}\rangle \end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix} P & c_1 & \langle 1.3,3.99\rangle \\ & c_2 & \langle 1.4,3.99\rangle \\ & c_3 & \langle -100,-350\rangle \\ & c_4 & \langle 500,250\rangle \end{bmatrix}$$

(2) 根据距的定义，计算待识别样本 p 与 P_0 的单指标关联函数值 $K_i(v_i)$：

距的计算：

$$\rho(v_i,V_{0i})=\left|v_{0i}-\frac{a_{0i}+b_{0i}}{2}\right|-\frac{b_{0i}-a_{0i}}{2}$$

$$\rho(v_i,V_{pi})=\left|v_i-\frac{a_{pi}+b_{pi}}{2}\right|-\frac{b_{pi}-a_{pi}}{2}$$

关联函数值的计算公式：

$$K_i(v_i)=\frac{-\rho(v_i,V_{0i})}{|V_{0i}|} \qquad (v_i\in V_{0i})$$

$$K_i(v_i)=\frac{\rho(v_i,V_{0i})}{\rho(v_i,V_{pi})-\rho(v_i,V_{0i})} \qquad (v_i\notin V_{0i})$$

式中，$V_{0i}=b_{0i}-a_{0i}$；$K_i(v_i)$ 为单指标关联函数，其他符号的含义与取值与前面相同。

(3) 各指标权重的确定：

层次分析(AHP)和专家集成的方法：

首先找出与半湿润、半干旱区界限划分有关的各个因子，然后将这些因子按关联隶属度关系构成递阶层次模型。通过对层次结构中各因子的相对重要性判断，进行层层排序。以此为基础，着眼于各因子在界线附近的实际空间分异程度，结合前人的经验，经专家集成，客观地做出了 4 个指标的权重值。即年干燥度指数 $\lambda_1=0.24$，生长季干燥度指数 $\lambda_2=0.26$，土壤水分盈亏量 $\lambda_3=0.26$，年降水量 $\lambda_4=0.24$。

(4) 待识别样本 p 与 P_0 的多指标综合关联函数 $K(p)$ 的计算(计算隶属程度)：

$$K(p)=\sum_{i=1}^{4}\lambda_i K_i(v_i)$$

式中，$K(p)$ 为 p 属于 P_0 的程度，并且当 $K(p)\geqslant 0$ 时，$p\in P_0$(半干旱区)；当 $-1<K(p)<0$ 时，$p\in P$，但 $p\notin P_0$；而当 $K(p)<-1$ 时，$p\notin P$。

运用上述公式可以求出各地的关联函数，即隶属程度，并识别各地是属于半湿润区还是半干旱区。

水的酸性中和能力 (ANC)

Stoddard J L, Driscoll C T, Kahl J S et al: 趋势可以外推到一个区域吗？东北地区的一个酸性例子 Ecological Applications, 2001, 11(2)

ANC 是指水对外来强酸中和能力的测度，反过来，它与酸性敏感度有关(低 ANC 值表示高敏感度)：

$$\begin{aligned}ANC&=\sum(\text{阳离子})-\sum(\text{阴离子})\\&=2[Ca^{2+}]+2[Mg^{2+}]+[Na^{+}]+\\&\quad[K^{+}]-2[SO_4^{2-}]-[NO_3^{-}]-[Cl^{-}]\end{aligned}$$

森林净初级生产量的测定模型

Clark D A, Brown S, Kicklighter D W et al: 森林的净初级生产量的测定：概念与研究方法 Ecological Applications, 2001, 11(2)

(1) 地面上生物量的增量：

方法 1：

$$\text{林分增量}=\left(\sum\text{未死的树的增量}\right)+\left(\sum\text{生长的增量}\right)$$

方法 2：

$$\begin{aligned}\text{林分增量}=&\left(\sum A_{CB}\text{ 在 }t_2-\sum A_{CB}\text{ 在 }t_1\right)+\\&\left(\sum\text{在这区间死亡的树的生物量}\right)-\\&\left[(\text{最小的树的生物量})\times(\text{新生树的数量})\right]\end{aligned}$$

式中，A_{GB} 是活树的地面生物量。

(2) *NPP* 和生态系统中 CO_2 与空气的净交换量(NEE)的关系：

$$\mathrm{NEE} = R_h - NPP$$

式中，NEE 是该地森林与空气之间净碳通量；R_h 是指异养呼吸作用。

纯林自然稀疏分析模型

薛立，萩原秋男：纯林自然稀疏研究综述。生态学报，2001，21(5)

(1) 自然稀疏法则：

拥挤的纯林中平均个体重 w 与密度 ρ 的关系模型：

$$w = K\rho^{-\alpha}$$

式中，K 为常数；$-\alpha$ 为 $w-\rho$ 的双对数图上自然稀疏线的斜率。

(2) 异速生长模型：

$$w = K\rho^{-\frac{1}{1-(\theta+\delta)}}$$

式中，$-\dfrac{1}{1-(\theta+\delta)}$ 相当于(1)中 $-\alpha$ 为 $w-\rho$ 的双对数图上自然稀疏线的斜率。

(3) 平均个体重和密度的时间轨线——lg w-lg ρ 的轨线模型：

$$w = \frac{K\rho^{-\alpha}\left(1-\dfrac{\rho}{\rho_o}\right)^{\alpha-1}}{1+\dfrac{\rho_i^{*}}{\rho_o}\left(\dfrac{\rho_i^{*}}{\rho}-\dfrac{\rho_i^{*}}{\rho_o}\right)^{-\left(\frac{1}{v}+1-\alpha\right)}} \qquad \left(\frac{1}{\rho_o}=\frac{1}{\rho_i}-\frac{1}{\rho_i^{*}}\right)$$

式中，K 为常数；$-\alpha$ 为 $w-\rho$ 的双对数图上自然稀疏动力线的斜率；ρ 为林分的密度；ρ_0 为 ρ_i^{*} 林分的最初密度，而 ρ_i^{*} 林分是从最初的生长阶段起到达自然稀疏动力线的林分。

集合种群动态理论模型

赵淑清，方精云，雷光春：物种保护的理论基础——从岛屿生物地理学理论到集合种群理论。生态学报，2001，21(7)

(1) Levins 模型：

$$\frac{dP}{dt} = mP(1-P) - eP$$

式中，P 为概率与斑块有种群定居的比例；$1-P$ 为当前未被定居斑块的比例；m，e 分别为侵占和灭绝参数。

(2) 关联函数模型：

$$J_i = \frac{C_i}{C_i + E_i}$$

式中，J_i 为该种在斑块 i 的关联；C_i 为斑块被重新定居的概率；E_i 为种群灭绝概率。

第十九章　个体与生理生态学

树冠下农作物光合作用和二氧化碳流理论模型

Monteith J L, Szeicz G, Yabuki K：树冠下面的农作物光合作用和二氧化碳流. Ecological Applications, 1965, 1(2)

(1) 大气层(F_a)中向下的CO_2流可表达为：

$$F_a = [\varphi(z) - \varphi(0)] / r_a$$

从土壤(F_a)中向上的CO_2流可表达为：

$$F_b = [\varphi_s - \varphi(0)] / r_b$$

式中，$\varphi(z)$、$\varphi(0)$和φ_s是大气层中高度z的CO_2浓度、在农作物的表面的CO_2浓度和土壤中CO_2浓度；r_a是在大气高度z和农作物表面之间的扩散阻力；r_b是在农作物表面和土壤中呼吸的二氧化碳源之间的阻力。

(2) 总光合作用率（P）：

$$P = \varphi(0) / r_L$$

式中，r_L是总植物阻力。

总光合作用率和顶部呼吸率(R_t)的差等于向树冠方向的总的CO_2流量，可表达为：

$$P - R_t = F_a + F_b$$

(3) 碳平衡：

对植物，假设农作物中的碳以$A \mathrm{kg \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}}$来计算，总碳量的$\gamma$部分是每年通过分解而流失的碳，即：$\delta X / \delta t = A - \gamma X$。如果$X_0$是$t=0$时碳的重量，则：

$$X = (X_0 - A/\gamma)e^{-\gamma t} + A/\gamma$$

式中，t是时间。

光照叶片面积指数

Wilson J W：立地结构和光线渗透（I）. 光照叶片面积. Journal of Applied Ecology, 1967, 4(1)

(1) 当对于任何角度的光线，叶片面积指数都能完全覆盖地表时：

$$\text{光照叶片面积指数} = \Phi / \Phi_\beta$$

(2) 当叶片面积指数不足以完全覆盖地表时：

$$\text{光照叶片面积指数} = \Phi(1 - e^{-\phi_\beta}) / \phi_\beta$$

$$\text{阴影叶片面积指数} = \Phi - \Phi(1 - e^{-\phi_\beta}) / \phi_\beta$$

式中，Φ是叶片面积指数，是每单位面积土地上树叶的面积；Φ_β是地表每单位面积上树叶以倾斜度β投影到一个水平面上的总面积；ε是树叶的角度，是树叶与水平面的倾角；β是阳光与水平面的倾角；ϕ_β由下式决定：

当$\alpha \leqslant \beta$时：

$$\phi_\beta = \Phi \cos\alpha$$

当$\alpha > \beta$时：

$$\phi_\beta = \Phi \cos\alpha \left[1 + \frac{2}{\pi}(\tan\theta - \theta) \right]$$

$$\theta = \arccos(\tan\beta / \tan\alpha)$$

水蒸气和CO_2扩散的植物阻力模型

Whiteman P C, Koller D：水蒸气和CO_2扩散的全植物阻力的物种特性. Journal of Applied Ecology, 1967, 4(2)

水蒸气流（T）：

$$T = \frac{(v)_s - (v)_{atm}}{r_e + r_a}$$

进入树叶的CO_2(P)流：

$$P = \frac{(CO_2) - (CO_2)_{chl}}{r'_a + r'_e + r'_m}$$

式中，(v)和(CO_2)代表水蒸气和CO_2的浓度；下标s代表叶肉细胞表面的状况；下标e代表树叶表面；下标(atm)代表大气；下标chl代表叶绿体；水蒸气(r)和CO_2(r')的扩散阻力由下标a(对于树叶表面和大气之间的边界层)、e(对于表皮、由气孔和表皮阻力构成，分别用r_s和r_c表示)、m(对于叶肉细胞中的路径，等同于叶绿体)指定。

$$r_e = \frac{r_c r_s}{r_c + r_s}$$

r 与 r' 的比率：

$$\frac{r}{r'}=\frac{D_{CO_2}}{D_{H_2O}}$$

式中，D_{H_2O} 和 D_{CO_2} 分别是大气中水蒸气和 CO_2 扩散常数

叶绿素基础(E_c)上的净同化作用率

Hunt L A，Cooper J P：7种温带饲料草的生产力和植冠结构 Journal of Applied Ecology，1967，4(2)

$$E_c=\frac{\ln_e L_c''-\ln_e L_c'}{t_2-t_1}\frac{W_2-W_1}{L_c''-L_c'}$$

式中，W_1 和 W_2、L_c' 和 L_c'' 分别是在 t_1 和 t_2 时刻，收割草皮地面上单位面积的平均干重和叶绿素的量。

植物个体的叶面积和总干重模型

Hughes A P，Freeman P R：利用经常的小收获进行生长分析 Journal of Applied Ecology，1967，4(2)

$$\ln W=a+bt+ct^2+dt^3$$

$$\ln A=e+ft+gt^2+ht^3$$

式中，W 是植物的总干重；A 是叶面积；t 是时间天数；a、b、c、d、e、f、g 和 h 均是回归系数。

平均根需求量系数

Nye P H，Tinker P B：根需求量系数的概念 Journal of Applied Ecology，1968，5(2)

$$\overline{\alpha r}=\frac{\sum\alpha_j r_j l_j}{L}$$

式中，下标 j 指根要素；α_j 是根要素系数 j 的根吸收能力；r_j 是根要素系数 j 的半径；l_j 是根要素系数 j 的长度；L 是根系统的总长度。

$$2\pi\overline{\alpha r}=\frac{W}{L}\cdot\frac{X}{C_{1,i}}\left(\frac{dW}{dt}\cdot\frac{1}{W}-\frac{dX}{dt}\cdot\frac{1}{X}\right)$$

式中，W 是植物的总干重；X 是全植物的平均营养浓度；$C_{1,i}$ 是溶液中营养的初浓度；t 是时间。

与根的数量有关的土壤阻力理论估算模型

Newman E I：土壤和植物中水分流动的持续性 I. 与根的数量有关的土壤阻力：理论估算 Journal of Applied Ecology，1969，6(1)

估算根表面和土壤中一点之间的土壤衬质势电差异的稳定状态公式：

$$\tau_b-\tau_r=\frac{q}{4\pi k}\ln\frac{b^2}{r^2}$$

或：

$$\tau_b-\tau_r=\frac{E}{2\pi kL_A}\ln\frac{b}{r}$$

式中，τ_b 和 τ_r 分别是在距离 b 和根表面上的衬质势；k 是土壤毛细作用传导率；根被看做是一个半径为 r 的均匀圆柱体；以一个恒定的比例 q 从土壤中抽取水分；E 是蒸腾作用比率；L_A 是地表单位面积上根的长度。

不同天气状况下蒸腾作用率的计算公式

Newman E I：土壤和植物中的水分流动阻力 II. 根圈阻力实验证据的回顾 Journal of Applied Ecology，1969，6(2)

假设有一个特定的临界叶片水分潜力 ψ_ω，在这一位置蒸腾作用首先降到潜在比率以下，在这一点：

$$E_o=\frac{\tau_c-\psi_\omega}{R_s+R_p}$$

式中，E_o 是潜在蒸腾作用率；τ_c 是膨压损失点(例如，临界土壤衬质势)；R_s 和 R_p 分别是土壤和植物路径阻力。

净初级生产模型

McNaughton F：苏格兰西部 *Acer pseudoplatanus* 的净初级生产 Journal of Applied Ecology，1970，7(3)

(1) 平均相对生长率：

$$R_m=\frac{\ln W_2-\ln W_1}{t_2-t_1}$$

式中，W_2 和 W_1 是时间 t_2 和 t_1 时的重量。

(2) 平均净同化作用：

$$E_m=\frac{W_2-W_1}{t_2-t_1}\frac{\ln L_2-\ln L_1}{L_2-L_1}$$

式中，L_2 和 L_1 是时间 t_2 和 t_1 时存在的叶面积。

也可以写为：

$$E_m=\frac{W_2-W_1}{t_2-t_1}\frac{\ln L}{L}$$

式中，当秧苗长高时，L 变成现存叶面积。

(3) 叶面积比率(R_{la})：

$$R_{la}=\frac{\ln W_2-\ln W_1}{W_2-W_1}\frac{L}{\ln L}$$

西特喀云杉的光合作用模型

Ludlow M M, Jarvis P G：西特喀云杉［*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.］Ⅰ. 光合作用的一般性质. Journal of Applied Ecology, 1971, 8(3)

(1) 叶肉细胞间的平均 CO_2 浓度(C_i)表达为：

$$C_i = C_a - F(r_s + r_a)$$

(2) 通过叶肉的液体中 CO_2 流量：

$$F + \beta R = (C_i - C_c) / r_m$$

(3) 羧化作用中总 CO_2 流量为：

$$F + R = (C_c - C_o) / r_x$$

(4) CO_2 流量和平均细胞间 CO_2 浓度的线性关系为：

$$r_M = \frac{dC_i}{dF}$$

式中，C_a 是大气中 CO_2 浓度；C_c 和 C_o 分别是羧化作用进行时和结束时的 CO_2 浓度；β 是光呼吸并到达细胞间的 CO_2(R)部分；F 是 CO_2 流；r_a 是 CO_2 传输的等效阻力；r_s 是 CO_2 传输的气孔阻力；r_m 是 CO_2 以液体状态传输的的物理阻力；r_x 是羧化作用阻力；r_M 被定义为叶肉阻力。

叶片的蒸腾作用模型

Lomas J, Schlesinger E, Zilka M：在喷灌、土壤湿度和天气影响下马铃薯叶面温度与大气温度之间的关系。Journal of Applied Ecology, 1972, 9(1)

$$LE = (1 - a - t)S_i + R_s + R_g - R_l \pm C \pm s$$

式中，L 是蒸发潜热；E 是蒸腾作用率；a 是反射率；t 是叶片对短波辐射的透射率；S_i 是叶片上的短波流；R_s 是天空的热辐射流；R_g 是更低层叶片和地表的热辐射流；R_l 是叶片发出的热辐射流；C 是对流中的能量传输；s 是储存在叶片中的能量。

$$R_g = \sigma T_a^4$$

$$R_l = 2\sigma T_l^4$$

$$C = h_c(T_a - T_l)$$

式中，σ 是 Stefan-Boltzmann 常数；T_a 是大气温度；T_l 是叶片温度；h_c 是对流系数。

植物的生长和呼吸作用模型

Thornley J H M, Hesketh J D：棉花圆荚中的生长和呼吸作用. Journal of Applied Ecology, 1972, 9(1)

(1) 植物生长、呼吸和维持的理论关系式：

$$r = m + \frac{1 - Y_G}{Y_G}\frac{1}{W}\frac{dW}{dt}$$

式中，r 是种的呼吸率；m 是种的维持呼吸率；Y_G 是除了维持生活之外培养基变成植物干物质的转换效率；W 是植物或植物一部分的干重；t 是时间天数。

(2) 植物生长的经验方程：

$$\ln W = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$$

$$r = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3$$

式中，a_0，a_1，a_2，a_3，b_0，b_1，b_2 和 b_3 都为回归常数。

水分传输的增长和水分利用模型

Lawlor D W：lolium perenne Ⅰ. 水分传输的增长和水分利用. Journal of Applied Ecology, 1972, 9(1)

(1) 综合的土壤衬质势：

$$\bar{\tau} = \left[\sum K_i L_i(\tau_i + Z_i)\right] / \sum K_i L_i$$

式中，$\bar{\tau}$ 是综合 i 水平之后的土壤水潜能；τ_i 是土壤衬质势；L_i 是每单位容积传导率为 K_i 的土壤中根的长度；Z_i 是从土壤表面到 i 层中央的垂直距离。

(2) 水流到根部时大块土壤($\bar{\theta}$)和根表面土壤(θ_1)中土壤水流量的差异为：

1) 稳定态方程：

$$\theta_1 = \bar{\theta} - \frac{Q}{2D}(r_2^2 - r_1^2)\left[\frac{r_2^2 \ln(r_2 / r_1)}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{1}{2}\right]$$

2) 稳定率方程：

$$\theta_1 = \bar{\theta} - \frac{Q}{2D}\left(\frac{r_2^4}{r_2^2 - r_1^2}\ln\frac{r_2}{r_1} - \frac{3r_2^2 - r_1^2}{4}\right)$$

式中，r_1 是根半径；$r_2 = \left(\frac{1}{\pi L}\right)^{1/2}$；$L$ 是根密度；Q 是单位容积土壤中水的抽取率；D 是扩散率。

(3) 根表面 τ_{rs} 土壤水衬质势的估算：

$$\tau_{rs} = \frac{q}{4\pi K}\left(\ln\frac{4Dt}{a^2} - 0.577\right) + \tau_{soil}$$

式中，q 是水进入根内 1 cm 的比例；τ_{soil}，K 和 D 是指大块土壤；t 是时间天数；a 是根直径。

(4) 土壤层中水流阻力：

$$q_h = \frac{\Psi - \tau}{R_h}$$

式中，q_h 是整个层中每天土壤水损耗率；τ 是本层中的大块水潜能；ψ 是叶片水潜能；R_h 是水运动的总阻力。

黑麦草和大麦的根和空中部分暗呼吸作用模型

Mogensen V O：意大利黑麦草和大麦的根和空中部分暗呼吸作用率的野外测量．Journal of Applied Ecology, 1977, 14

(1) 温度对呼吸作用的影响：

$$R = R_r \cdot Q_{10}^{(T-T_r)/10}$$

式中，R 和 R_r 分别是实际温度 T 和参考温度 T_r 下的呼吸作用率；Q_{10} 是温度每增加 10℃时呼吸作用率的增加量。

(2) 每晚根和空中部分的平均呼吸作用率（$\overline{R}$）是由每 16 小时的观察值（R_i）被平均温度 $\overline{T}$ 修正后计算：

$$\overline{R} = \sum_{i=1}^{16}[R_i / Q_{10}^{(T_i - \overline{T})/10}]/16$$

(3) 生长和维持的呼吸作用：

$$R = kP + cW$$

式中，k 是生长呼吸作用系数；c 是维持呼吸作用系数。

年龄和天气对产卵的影响模型

Gossard T W, Jones R E：在 Pieris Rapae L 地区年龄和天气对产卵的影响．Journal of Applied Ecology, 1977, 14

(1) 年龄对产卵的影响：

$$E = Ax^B e^{-Cx}$$

式中，E 是每天的卵产量；x 是大于幼虫发育临界值的年龄，单位是°C·d(D°)；A、B 和 C 是适宜性常数。

(2) 温度的影响：

$$E = Atx^B e^{-Cx}$$

式中，t 是一天中 D° 累积的数量。

(3) 存活到年龄 $x = 1/(1+0.013e^{0.28x})$ 的部分：

在任意年龄段(x_1 到 x_2)的净存活率为：

$$(x_1 \to x_2) = (1+0.013e^{0.28x_1})/(1+0.013e^{0.28x_2})$$

TELOC 模型

Wheeler G L, Sale M J：TELOC——促进玉米(玉蜀黍属玉米)生长的效果的仿真模型．Ecological Modelling, 1980, 11

(1) 促进吸收和迁移——土壤系统中铅的质量平衡方程为：

$$T_{PB}(W+S) = S_{PB}W + B_{PB}S$$

式中，T_{PB} 是土壤系统中的总含铅量；W 和 S 分别是水和土壤的重量；S_{PB} 是土壤系统中的可溶性铅；B_{PB} 是附着在交换柱上的铅，其计算公式可表达为：$B_{PB} = (PB_{MAX} \times k_1 S_{PB})/(1+k_1 S_{PB})$，$PB_{MAX}$ 是土壤对铅的吸附能力，k_1 是一个常数。

进入根部，然后经过植物体达到树叶的铅流量遵循蒸腾作用的流动过程：

$$DT_{PB} = k_2 TR_{ANS} \times 10^5 SP_B$$

$$DL_{PB} = k_3 DT_{PB}$$

式中，DT_{PB} 和 DL_{PB} 是进入根部和树叶的铅的流动速率；TR_{ANS} 是蒸腾作用速率；k_2 和 k_3 是常数。

(2) 生理作用、光合作用、呼吸作用和生长：

树冠以 0.1 LAI 为间隔分层。假定树冠内部光照的分布遵循 Beer 定律。则第 n 层（I_n）的光照为：

$$I_n = I_0(1-k_4)\exp(k_5 L)$$

式中，I_0 是入射辐射；L 是前面的层数；k_4 是反射系数；k_5 是吸收系数。

第 n 层的毛光合作用的每小时速率使用 de Wit 等人(1970)的函数计算：

$$PH_{SYN} = k_6 I_n \cdot KT \cdot P_{EP}/(k_7 + I_n)$$

式中，PH_{SYN} 是毛光合作用；k_6 和 k_7 是常数；P_{EP} 是促进光合作用的效果，它是树叶铅水平(L_{PB})的函数。

净初级生产力(*NPP*)

Falk J H：适宜环境中草地的初级生产力．Journal of Applied Ecology, 1980, 17

$$NPP = \sum_{i=1}^{n} B_i(A) + B\max_{(s)}\theta_s + B\max_{(r)}\theta_r + H$$

式中，$B_i(A)$ 是在第 i 取样期中的产量(所有活着的 5cm 以上的气生植物部分)；$B\max_{(s)}$ 是活着的断株的最大标准产量；θ_s 是断株的周转率；$B\max_{(r)}$ 是根的

最大标准产量；O_r 是根的周转率；H 是食草动物引起的损失量

森林食叶昆虫密度的动态模型

Rubtsov V V, Shvytov I A：森林食叶昆虫密度的动态模型 Ecological Modelling, 1980,8

(1) 三个主要变量和常规系统方程：

$$\dot{X} = F_X(X,Y,Z,\delta,\gamma_1,\gamma_2,\gamma_3)$$

$$\dot{Y} = F_Y(X,Y,Z,\delta)$$

$$\dot{Z} = F_Z(X,Y,Z,\delta)$$

式中，X 是害虫的种群密度；Y 是树叶的生物量密度；Z 是幼虫的密度；δ 是幼虫阶段天气状况参数；γ_1，γ_2 和 γ_3 分别是影响橡树叶卷曲幼虫的寄生虫、鸟类捕食者和疾病参数。

(2) 毛虫密度的动态方程为：

$$\mathrm{d}X/\mathrm{d}t = -\alpha(\delta)\cdot\mu(\gamma_1,\gamma_2,\gamma_3)\cdot\hat{\upsilon}(X,Y,Z)\cdot X$$

式中，$\alpha(\delta)$ 是描述天气对个体缺陷密度影响的参数；概括性参数 μ 表示寄生虫、鸟类捕食者和疾病对橡树叶卷曲幼虫的影响水平；$\hat{\upsilon}(X,Y,Z)$ 是食物限制函数。

(3) 没有害虫时橡树叶的自然生长率可用下面的方程描述：

$$\mathrm{d}Y/\mathrm{d}t = \beta Y - \theta Y^2$$

式中，β 表示树叶生物量增长的特定速率；θ 表示增长限制因子的影响水平。

(4) 幼虫生物量的增长可用下面的方程表示：

$$\mathrm{d}Z/\mathrm{d}t = \varepsilon(\delta)\hat{\sigma}(X,Y,Z)Z$$

式中，$\hat{\sigma}(X,Y,Z)$ 是限制函数，假定 $\hat{\sigma}(X,Y,Z)=\sigma(Y/XZ)$，$\varepsilon(\delta)$ 的峰值对应于大的树叶损失和非常肥胖的幼虫。

(5) 对于被幼虫吃掉的树叶的动力学有如下的关系：

$$\dot{Y} = gX\dot{Z}$$

式中，$g=1/K$，且 K 是幼虫对食物的同化作用系数。

橡树叶的动力学如下：

$$\mathrm{d}Y/\mathrm{d}t = \beta(\delta)Y - \theta(\delta)Y^2 - g\sigma(Y/XZ)XZ$$

Nicholson 模型及其同源微分方程

马世骏，刘来福，徐汝梅：Nicholson 模型及其同源微分方程的稳定性分析，生态学报，1981，1(1)

(1) Nicholson 差分模型：

$$\lg H_{n+1} = \lg H_n - \frac{aP_n}{2.3} + \lg F$$

$$P_{n+1} = H_n - H_n e^{-aP_n}$$

式中，H_{n+1} 和 H_n 分别为第 $n+1$ 代和第 n 代的寄主数量或密度；P_{n+1} 和 P_n 分别为第 $n+1$ 代和第 n 代的雌寄主蜂数量或密度；a 为发现域；F 为寄主种群的繁殖率。

(2) 同源微分方程：

$$\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t} = \left(Fe^{-aP} - 1\right)H$$

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t} = H\left(1 - e^{-aP}\right) - P$$

基于相对生长率的仿真模型

Fetcher N：放草对冻原灌木的影响——基于相对生长率的仿真模型 Ecological Modelling, 1981, 13

(1) 生长率乘数：

两个乘数表达了生物气候学的影响(E)：

$$E = u(H - H_{s1})u(H_{s2} - H)$$

式中，H 是一个热量总数；H_{s1} 是幼苗生长所需的总热量的值；H_{s2} 是停止幼苗生长所需的总热量的值；函数 $u(x-y)$ 是单位阶跃函数，可定义为：如果 $x-y>0$，则 $u(x-y)=1$；如果 $x-y\leqslant 0$，则 $u(x-y)=0$。

任意时间 k 的总热量 H 可被定义为下面的函数：

$$H_k = \sum[(T_i - H_{T\min})u(T_i - H_{T\min})u(H_{T\max} - T_i) + H_{T\max}u(T_i - H_{T\max})]$$

式中，T 是平均每周的温度；$H_{T\min}$ 是用来提高植物音位的最小温度；$H_{T\max}$ 是一个温度，超过这个温度，每一周植物的音位就会提高一个常数量。

(2) 温度对植物生长率的影响用每周平均温度的两个函数中的一个来表达，称为 T_{eff}，即：

$$T_{\mathrm{eff}} = T_{\mathrm{av}} + 0.637(T_{\max} - T_{\mathrm{av}})$$

式中，$T_{\max}$ 是平均每周最高温度；T_{av} 是平均每周温度。

(3) Richman 等人 (1975) 第一个使用的温度乘数的函数 Q_I，可表达为：

$$Q_I = \exp\{-[B^T((T_{opt} - T)/T)^2]\}$$

式中，T_{opt} 是生长的最优温度；B 是决定低温生长停止点的常数

(4) 乘数 Q_G 描述树叶年龄对净同化作用的影响：

$$Q_G = L(G, LQ_G)$$

式中，LQ_G 是一个表格，含有 G 及其对应的 Q_G 的值；L 是对表格中的值进行线性插值的函数。

(5) 土壤水分的模拟：

土壤水乘数 Q_θ 的值：

$$Q_\theta = \left[\left(\frac{f'(\overline{\theta_k})}{W_s^{(k)}}\right)^{1/(N-k)} - 1\right] \Big/ C^{(k)}$$

式中，$\overline{\theta_k}$ 是从时间 0 到 k 的平均土壤水百分率；$C^{(k)}$ 是在时间 k 所有其他的乘数的乘积；$W_s^{(k)}$ 是在时间 k 的活跃幼苗的生物量；N 是以周为单位的生长季的长度

Ludwig-Jones-Holling (LJH)立地模型

Casti J: 云杉蚜虫爆发的灾难、控制和必然性. Ecological Modelling, 1982, 14

$$dB/dt = \alpha_1 B[1 - B(\alpha_3 + E^2)/\alpha_2 SE^2] - \alpha_4 B^2/(\alpha_5 S^2 + B^2)$$

$$dS/dt = \alpha_6 S[1 - \alpha_7 S/\alpha_8 E]$$

$$dE/dt = \alpha_9 E[1 - E/\alpha_7] - \alpha_{10} BE^2/S(\alpha_3 + E^2)$$

式中，B 是蚜虫密度，且 $B>0$；S 是一块生境中树枝的总表面积，且 $S>0$；E 是生境的"能量储备"，指示生境中树木的树叶状况和健康，$0 \leqslant E \leqslant 1$；参数 $\alpha_1 - \alpha_{10}$ 表示不同的内在生长率、捕食率等。

由 $\overline{B}$ 的代数方程，平衡状态的蚜虫水平可表达为：

$$\alpha_1\alpha_7^3(\alpha_3 + \overline{E}^2)\overline{B}^3 - \alpha_1\alpha_2\alpha_7^2\alpha_8\overline{E}^3\overline{B}^2 + \alpha_1\alpha_5\alpha_7\alpha_8^2(\alpha_3 - \overline{E}^2)\overline{B} - \alpha_2\alpha_4\alpha_7^2\alpha_8\overline{E}^3\overline{B} - \alpha_1\alpha_2\alpha_5\alpha_8^2\overline{E}^5 = 0$$

引入新的变量：

$$y = \overline{B} - \alpha_2\alpha_8\overline{E}^3/3\alpha_7(\alpha_3 + \overline{E}^2)$$

则可发现 y 满足三次方程：

$$-(y^3 + t_1 y + t_2) = 0$$

式中，

$$t_1 = -\alpha_8\overline{E}^2/\alpha_7^2[\alpha_2^2\alpha_8 E^4/3(\alpha_3 - E^2)^2 - \alpha_2\alpha_4\alpha_7\overline{E}/\alpha_1(\alpha_3 - \overline{E}^2) - \alpha_5\alpha_8]$$

$$t_2 = -\alpha_2\alpha_8^2\overline{E}^5/9\alpha_7^3(\alpha_3 + \overline{E}^2) \times [2\alpha_2^2\alpha_8\overline{E}^4/3(\alpha_3 + \overline{E}^2)^2 - 3\alpha_2\alpha_4\alpha_7\overline{E}/\alpha_1(\alpha_3 + \overline{E}^2) + 6\alpha_5\alpha_8]$$

灾难理论将把前面的方程看做是"三次曲线"顶点灾难的典型形态。

植物生长过程模型

Kundu S S, Skogerboe G V, Walker W R: 科恩格罗(CORNGRO)模型的改进与灵敏度分析. Ecological Modelling, 1982, 16

(1) 生长阶段：

$$\text{DEGD30} = \sum_{\text{planting}}^{\text{maturity}} [(T_{max} - T_{min})/2 - 10.0°C]$$

式中，DEGD30 是自栽培以来的积温；T_{max} 是日最高温，$10℃ \leqslant T_{max} \leqslant 30℃$；$T_{min}$ 是日最低温，$10℃ \leqslant T_{min} \leqslant 30℃$；$T_{av}$ 为平均温度，假定它每一个小时在半点时测定一次。

(2) 在最高温度出现前：

$$T_{av} = T_{min} + \{\sin[(\pi/2)X_{time}/(S_N + 2.0)]\}(T_{max} - T_{min})$$

(3) 在最高温度出后：

$$T_{av} = T_{max} - \{\sin[(\pi/2)(X_{time} - S_N - 2.0)/(22.0 - S_N)]\} \times (T_{max} - T_{minf})$$

式中，X_{time} 是自黎明时的半点起经过的小时数；S_N 是白昼小时数的一半的整数部分；T_{minf} 是第二天的最低日温。

$$P_{HO} = P_{snk}(F_{rad})F_{leaf}(F_{water})F_{cho}$$

式中，P_{HO} 是总光合作用；P_{snk} 是在平均可用碳水化合物水平及辐射强度时光合作用速度；F_{rad} 是与辐射强度相关的辐射系数；F_{leaf} 是被阳光照射的叶面积的百分比；F_{water} 是叶面水潜力系数；F_{cho} 是指有效碳水化合物系数。

(4) 维持呼吸作用的消耗模型：

$$R_M = C_{30}(0.044 - 0.0019T + 0.001T^2)D_{TOT}/A_{LEAF}$$

式中，R_M是在植物生长过程的一个小时内的维持呼吸作用的消耗；C_{30}是维持效率；T是气温；D_{TOT}是在一个小时间隔开始时总的植物干物质；A_{LEAF}是在一个小时间隔开始时的叶面积。

(5) 干物质产量：

$$D_{MP} = 3.76(R_{ESPT} - R_M)$$

式中，D_{MP}是指干物质产量，R_{ESTP}是在植物生长过程的一个小时内总的呼吸作用。

(6) 总的干物质产量：

$$T_{DM} = 2.471\times 10^{-6}(D_{EAR} + D_{MAT})IPP$$

式中，T_{DM}是指总的干物质产量($t\cdot hm^{-2}$)；D_{EAR}是指穗的干物质量；D_{MAT}是指每株植物茎和叶子的干物质(g)；IPP是每英亩的植物数。

昆虫发育速率与温度关系的数学模型

王如松，兰仲雄，丁岩钦：昆虫发育速率与温度关系的数学模型研究．生态学报，1982，2(1)

(1) 线性关系：

$$V(T) = \frac{1}{K}(T - T_L)$$

式中，$K = D(T - T_L)$为一常数，D为发育历期；$T - T_L$为该历期内的有效温度(超过发育零点T_L以上的温度)；V为平均发育速率。

(2) 指数关系：

$$V(T) = V_0\cdot\exp\left[\frac{\mu}{2}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right]$$

(3) Logistic 关系：

$$V(T) = \frac{K}{1 + \exp[-r(T - T_0)]}\times\left[1 - \exp\left(-\frac{T - T_L}{\delta_L}\right)\right]\left[1 - \exp\left(-\frac{T_H - T}{\delta_H}\right)\right]$$

式中，δ_L和δ_H分别为低、高温边界层的宽度。

小叶锦鸡儿灌丛地上生物量的预测模式

姜凤岐，卢凤勇：小叶锦鸡儿灌丛地上生物量的预测模式．生态学报，1982，2(2)

(1) 数学模式的基本原理：

Y_i估计值$\hat{Y}_i$方程：

$$\hat{Y}_i = \sum_{j=1}^{M}\sum_{k=1}^{r_j}\hat{C}_{jk}\delta_{i(jk)}$$

式中，M为自变量的总个数；C_{ij}表示X_j可分成r_j类；$\hat{C}_{jk}$为C_{ij}的估计值；X_j为自变量；$\delta_{i(jk)}$为反应。

(2) 数学模式的相关性检验：

1) 复相关系数R模型：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i - \bar{Y}\right)\left(\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i - \bar{Y}\right)^2\sum_{i=1}^{n}\left(\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}}\right)^2}}$$

式中，Y_i为实测值；$\bar{Y}$为观测值的平均值；$\hat{Y}_i$为预测值；$\bar{\hat{Y}}_i$为预测值的平均值。

2) 剩余标准差S模型：

$$S = \sqrt{\frac{\sum\left(Y_i - \hat{Y}\right)^2}{N - M - 1}}$$

式中，N为样本数；M为项目数(即自由度)。

金边土鳖增长能力r_c指数

刘复生，周昌清，林佩卿等：温度对金边土鳖试验种群影响的研究．生态学报，1982，2(3)

$$r_c = \frac{\ln R_0}{T_c}$$

式中，$R_0 = \sum l_x m_x$为种群的净增殖率；$T_c = \frac{\sum l_x m_x x}{\sum l_x m_x}$为雌性子代生出时母体的平均年龄；$l_x$为特定年龄的存活率；$m_x$为年龄；$x$为雌体的平均产雌数。

食叶昆虫生长的数学模型

Rubtsov V V：食叶昆虫生长的数学模型(以橡树叶虫为例)．Ecological Modelling, 1983, 18

$$\dot{x} = -k_x(\xi)\alpha(P,R,S,\xi)v(x,y,z)x$$

$$\dot{y} = -k_{y1}(\xi)y - k_{y2}(\xi)y^2 - mk_z\sigma(x,y,z)xz$$

$$\dot{z} = k_z(\xi)\sigma(x,y,z)z$$

式中，x和y分别表示橡叶虫种群的密度和橡叶生物量的密度；z是指个体的平均生物量；ξ表示在幼虫阶段的成长持续时间；参数$k_z(\xi)$和$k_x(\xi)$分别表示幼虫进食的强度与死亡率；$k_{y1}(\xi)$和$k_{y2}(\xi)$表示橡叶生长速度；系数m的值决定于幼虫的食物消化程度；

$v(x,y,z)$ 和 $\sigma(x,y,z)$ 反映在过剩的种群个体减少、能量支出增加，从而导致幼虫体重减轻的情况下的平均进食强度；参数 ε 并无显著特点，它反映了由不同的肉食动物、寄生虫及在种群中传播的疾病共同影响的幼虫死亡率。

莫诺模型

Vavilin V A, Vasiliev V B：活性淤泥粒子对简单培养基的消耗机制研究．Ecological Modelling, 1983, 18

$$\rho = \rho_{\max} S/(K_S + S)$$

式中，ρ 是浓度为 S 的简单培养基的特有氧化速度；$\rho_{\max}$ 是最大的特有氧化速度；K_S 是半饱和常数。

(1) 半饱和常数：

$$K_S \propto S_{cr}[(1/3 - 1/2^{5/3} + (\delta/R)(D_i/D_c)/6)x^2R^2 + 1/2]$$

式中，S_{cr} 是某一个临界培养基浓度，在这个浓度时，淤泥中单个微生物的氧化反应状态在 0 和 1 之间变化；D 和 D_c 分别是指培养基在水中和在淤泥粒子中的传播系数；R 是淤泥粒子的半径；δ 是扩散层的厚度，并且有 $x=(d_c\mu_m/YD_iS_{cr})^{1/2}$，$d_c$ 是淤泥粒子中微生物的干生物量的密度，μ_m 微生物种群的最大增长速度，Y 是培养基转化为淤泥生物量的系数。

(2) 在一个给定的培养基溶液浓度下，淤泥粒子对培养基的最大消耗量为：

$$V_{\max} = \frac{4}{3}\pi R^3 d_c \mu_m / Y$$

混生林演替模型

El-Bayoumi M A, Shugart H H, Jr et al：加拿大东部混生林演替模型。Ecological Modelling, 1983, 21

(1) 生物量方程：

$$\ln B_{IOM} = P_1 + P_2 \ln D$$

式中，B_{IOM} 是指胸径为 D 的树的个体生物量；P_1 和 P_2 分别是种的特定的和局部计算的参数。

(2) 一棵树在任意一年死亡的可能性与下式相关：

$$P = 4.605/\text{该物种的最大年龄}$$

云南松同化器官数量垂直分布统计分析模型

江洪，林鸿荣：云南松同化器官数量垂直分布的规律．生态学报，1983，3(2)

(1) 拟合数学方程：

$$y = ax^2 + bx + c$$

式中，y 为同化器官数目的理论值；x 为枝轮数；a、b 为回归系数；c 为常数。

(2) 相关系数 r 模型：

$$r = \sqrt{1 - \frac{S_{yx}^2}{S_y^2}}$$

$$S_{yx}^2 = \frac{\sum(y - y_i)^2}{n-3}$$

$$S_y^2 = \frac{\sum(y - \bar{y})^2}{n-1}$$

式中，y_i 为按方程计算出的 y 的理论值；$\bar{y}$ 为 y 的平均数。

(3) 剩余回归标准差 S_D 模型：

$$S_D = \sqrt{\frac{(1-r)^2 S_y^2}{n-1}}$$

鼠兔日食量干重 F 模型

钟文勤，周庆强，孙崇潞：达乌尔鼠兔的食物和食量研究．生态学报，1983，3(3)

$$F = \sum_{i=1}^{S}(A_i - B_i P_i')P_i$$

式中，A_i 为投饲量；B_i 为取食剩余量；P_i' 为各种植物试验前后的重量比率；P_i 为干鲜比率；S 为供试验植物种数。

污染物质积聚的阈值模型

Kohlmaier G H, Siré E O, Bröhl H et al：快死的德国云杉冷杉林的惊人发展．Ecological Modelling, 1983/1984, 22

把系统看作是一个黑箱，在这个黑箱中，一种污染物是被释放出或被分解或者两者都有是依据下面的容量限制消除机制来确定的：

$$\frac{dp}{dt} = I_0 - r\frac{p}{1+p/k}$$

式中，I_0 假定为常数或近于常数(与过去几年中 SO_2 的输入量相对应)；r 是比速率常数；k 是一个典型的容量水准。

林冠抑制光合作用的数学模型

Kohlmaier G H, Siré E O, Bröhl H et al：快死的德国云杉冷杉林的惊人发展　Ecological Modelling, 1983/1984, 22

$$\frac{dM^L}{dt} = \eta_L NPP - \psi_2 M^L / T$$

式中，M^L 为单位面积的平均叶面干物质；NPP 是总的净第一生产力；η_L 是参与叶面生物量的光合作用的分割系数；T 是在最佳环境条件下的平均寿命。

(1) 假定净第一生产力与被林冠截取的那部分光成比例：

$$NPP = NPP_{max}\psi_1[1-\exp(-\mu L)]$$

式中，μ 是林冠的消光系数；L 是叶面积指数、$\psi_1(\phi)$、$\psi_2(\phi)$ 分别指在压力变量为 ϕ_0 时的叶面的光合作用与分解速率。

(2) 在特定的叶面积 $s_L = L/M^L$ 时，叶面积指数在压力变量为 ϕ_0 时的稳定状态的计算可采用下式：

$$L_m = T\eta\ NPP_{max} s_L$$

可以得到下式：

$$\frac{dL}{dt} = \frac{1}{T}\{\psi_1(\phi)L_m[1-\exp(-\mu L) - \psi_2(\phi)L]\}$$

根的深度及永久萎蔫点的间接测定模型

Sauer R H, Warner M L, Hinds W T：根的深度及永久萎蔫点的间接测定　Ecological Modelling, 1983/1984, 22

$$E_{n,m} = \sum_{t=1}^{N}\sum_{i=1}^{n} f(W_{i,m})g(T_t)$$

式中，$E_{n,m}$ 是从永久萎蔫点的第 m 个选项及到土壤剖面的第 n 分米处计算出的暴露总量；$f(W)$ 是指表现植物对土壤水的反应的土壤水函数，它或者是 $f(P)$ 或者是 $f(\psi)$；$g(T)$ 是土壤温度函数；i 表示从土壤表面向下的第 i 分米；t 是指从生长季节开始的白昼时间；n 是在一个特定总和 E 下的剖面深度；N 是生长季节中的天数；$f(W_{i,m}) = (\psi_i - \psi_m)^+$ 或者 $f(W_{i,m}) = (P_i - P_m)^+$，$\psi_{i,t}$ 是在第 t 天、深度为 i 分米时的土壤水潜力，用 mPa 作单位，ψ_m 是永久萎蔫点的第 m 个选项的土壤水潜力(永久萎蔫点用巴或%表示，低于永久萎蔫点的水将不会产生可以量测出的产品)；$P_{i,t}$ 是在第 t 天，深度为 i 分米时的土壤水的重量百分比；P_m 是永久萎蔫点的第 m 个选项

南方松树甲虫生长的生物物理模型

Wagner T L, Gagne J A, Sharpe P J H et al：南方松树甲虫的生物物理模型　Ecological Modelling, 1983/1984, 21

$$r(T) = \frac{RH025\dfrac{T}{298.15}\exp\left[\dfrac{HA}{R}\left(\dfrac{1}{298.15}-\dfrac{1}{T}\right)\right]}{1-\exp\left[\dfrac{HL}{R}\left(\dfrac{1}{TL}-\dfrac{1}{T}\right)\right]+\exp\left[\dfrac{HH}{R}\left(\dfrac{1}{TH}-\dfrac{1}{T}\right)\right]}$$

式中，$r(T)$ 是在温度 T 时的发展速度；R 是通用气体常数；$RH025$ 是在 25℃并假定没有酶钝化时的发展速度；HA 是指由控制速率的酶催化反应所产生的活化热函；TL 是指速率控制酶处于半活性和半低温钝化时的绝对温度；HL 是与酶的低温钝化作用相联系的热函变化值；TH 是指速率控制酶处于半活性和半高温钝化时的绝对温度；HH 是与酶的高温钝化作用相联系的热函变化值。

盐沼碳循环模型

Harrison G W：盐沼碳循环模型中的不确定性分析方法间的比较　Ecological Modelling, 1984, 24

$$dx_1/dt = (\rho A(x_1) - e_A)x_1 - \tau F(x_1)B(x_2)x_2 + ux_3$$

$$dx_2/dt = \sigma F(x_1)B(x_2)x_2 - e_B x_2$$

$$dx_3/dt = vx_1 - e_u x_3$$

式中，x_1、x_2 和 x_3 分别是 Spartina 枝条、食草动物和 Spartina 根部中的碳浓度；ρ 是 Spartina 从光合作用中吸收碳的最大特定速率；e_A 是指通过呼吸作用排放到水里、非捕食死亡和流入根部而使 Spartina 枝条碳损失的特定速率；u 是碳从根部到枝条的特定迁移速率；τ 是食草动物碳消费的最大特定速率；σ 是食草动物对碳的同化作用的最大特定速率；e_B 是食草动物通过呼吸、排泄和死亡引起的碳的损失；v 是碳从枝条到根部的特定迁移速率；e_u 是指通过呼吸、排泄、死亡和流入枝条而使 Spartina 根系碳损失的特定速率。

$$令：\mathrm{sig}[y] = \begin{cases} 0 & (y \leqslant 0) \\ y & (0 < y < 1) \\ 1 & (1 \leqslant y) \end{cases}$$

则：

$$A(x_1) = \mathrm{sig}[L_A(Z_A - x_1)]$$

$$B(x_2) = \mathrm{sig}[L_B(Z_B - x_2)]$$

$$F(x_1) = \mathrm{sig}(x_1 / H_F)$$

式中，Z_A 是使光合作用终止的 Spartina 理论密度；L_A 是每增加一个单位的 Spartina 密度 x_1 所引起的碳生产的减少量因子，它大于拥挤极限值；Z_B 是使消耗停止时的食草动物的理论密度；L_B 是每增加一个单位的食草动物密度 x_2 所引起的碳吸收的减少量因子，它大于竞争极限值；H_1 是 Spartina 密度，如果低于这个密度，每个食草动物的消费率就要下降。

稻氯曲菌素侵袭的生态系统模型

Longstaff B C, Cuff W R：储备小麦遭受食物翠生的稻氯曲菌素侵袭的生态系统模型再评估 Ecological Modelling, 1984, 25

（1）发展速率、温度和湿度之间的关系：

$$Y = \exp(x_1 + x_2T - x_3T^2 + x_4\omega)$$

式中，Y 是每周中年龄段周期的数量；T 是温度；ω 是谷物湿度，单位是%；x_1、x_2 和 x_3 是常数。

（2）特定年龄的繁殖力：

$$V_i = ai^b \exp(-ci)$$

式中，V_i 是繁殖力，它是指在第 i 年龄段中一个雌性个体产生的雌性后代的数量；a，b 和 c 是常数。

（3）特定年龄的存活力：

$$P_i = c_4 \exp[-(u_{1i} + u_{2i})]T^*$$

式中，P_i 是特定年龄的存活率；u_{1i} 是特定年龄的即时死亡率；u_{2i} 是由于缺氧引起的特定年龄的即时死亡率；c_4 是第一龄幼虫的特殊年龄段存活率的比例因子；T^* 是一个温度订正值。

多年生禾草对落叶反应的模拟模型

Coughenour M B, McNaughton S J, Wallace L L：东非多年生禾草对落叶反应的模拟研究 Ecological Modelling, 1984, 26

放牧强度（G_1）、高度（H）和时间间隔（I）之间的关系：

（1）对于矮草：

$$G_1 = 0.963 - 0.042H - 0.097I - 0.00051H \cdot I$$

$$(r^2 = 0.95)$$

（2）对于中草：

$$G_1 = 1.05 - 0.026H - 0.0072I - 0.00021H \cdot I$$

$$(r^2 = 0.98)$$

（3）对于高草：

$$G_1 = 1.07 - 0.025H - 0.0071I - 0.00017H \cdot I$$

$$(r^2 = 0.98)$$

式中，时间间隔以天为单位，高度以厘米为单位。

改进的 IWAO 模型

徐汝梅，刘来福，丁岩钦：改进的 IWAO $\mathring{M}$-M 模型 生态学报，1984，4(2)

$$\mathring{m} = \alpha' + \beta' m + \gamma m^2$$

式中，α' 为每个基本成分中个体数的分布的平均拥挤度；β' 为在低密度下基本成分分布的相对聚集度；γ 为基本成分分布的相对聚集度随种群密度而变化的速率。

模糊相似优选比模型

毕伯钧：辽东地区引种扩种西洋参适宜气候生态区域的探讨 生态学报，1984，4(4)

$$\gamma_{ij} = \frac{D_i}{D_i + D_j} = 1 - \frac{D_j}{D_i + D_j},$$

$$(i, j = 1, 2, \cdots, 13)$$

式中，$D_i = |X_i - X_0|$，$D_j = |X_j - D_0|$ 分别为样本 X_i 和 X_j 与固定样本 X_0 的绝对值距离。

相关系数 r 和剩余回归标准差 SD 模型

林鸿荣，江洪，刘跃建：飞播云南松林叶面积指数的变动规律，植物生态学与地植物学丛刊，1984，8(4)

$$r = \sqrt{1 - \frac{s^2yx}{s^2y}}$$

$$SD = \sqrt{\frac{(1-r)^2 \cdot s^2y}{n-1}}$$

$$s^2yx = \frac{\sum(y - y_t)^2}{n-3}$$

$$s^2y = \frac{\sum(y - \bar{y})^2}{n-1}$$

式中，y 为叶面积指数；x 为林龄或密度；y_t 为 y 的理论值；$\bar{y}$ 为 y 的平均值。

棉田内棉铃虫卵分布型参数特征

丁岩钦，陈玉平：棉田内棉铃虫卵分布型参数特征及其应用 生态学报，1985，(1)

（1）棉铃虫卵在田间的分布型：

$$m^* = \alpha + \beta \bar{x}$$

式中，m^* 为平均拥挤度；$\bar{x}$ 为平均数；$\alpha=0.437$，$\beta=1.189$ 为实验结果。

(2) 棉铃虫卵在棉株上的未着卵株率 p_0（即零频率）与每株平均卵密度（$\bar{x}$）的关系模型：

$$x=k(p_0^{-\frac{1}{k}}-1)$$

式中，k 为负二项分布公共值。

枝条的死亡与根系死亡指数

Hanson J D, Parton W J, Innis G S：植物生长和草原生态系统的生产－建模方法的比较　Ecological Modelling, 1985, 29

(1) 叶片死亡定义如下：

$$D=(\mathrm{d}W+\mathrm{d}A+\mathrm{d}T)B+RG$$

式中，$\mathrm{d}W$、$\mathrm{d}A$ 和 $\mathrm{d}T$ 是依赖于水分压力、年龄和温度的死亡率；B 是叶片的生物量；G 是叶片的生长潜力；R 是参数。

(2) 根系死亡定义如下：

$$D=RB\max(T,M)$$

式中，R 是容易死亡的根系的比例；B 是根系的生物量；T 和 M 是温度和水分张力对根系死亡的影响。

相对生长率和绝对生长率模型

Olson R L, Jr, Sharpe P J H et al：整体植物建模－一个连续时间的 Markov (CTM) 方法　Ecological Modelling, 1985, 29

(1) 相对生长率：

$$R_{\mathrm{rg}}=\frac{1-e_1W}{e_2+e_3W}$$

式中，$e_1=\dfrac{\alpha_4(\lambda_{21}+\alpha_2H)}{\alpha_1\alpha_2IH}$；$e_3=\dfrac{e_1}{\lambda_{51}}$；

$$e_2=\frac{\alpha_3N\left[\lambda_{41}(\lambda_{21}+\alpha_2H)+\alpha_1I(\lambda_{41}+\alpha_2H)\right]+\alpha_1\alpha_2IH\lambda_{41}}{\alpha_1\alpha_2IHN\lambda_{41}}$$

(2) 绝对生长率（R_g）为：

$$R_g=\frac{W-e_1W^2}{e_2+e_3W}$$

式中，λ_{ij} 是平均转换率，指每单位时间从状态 i 到状态 j 转换的平均数；I 是光强度；H 是水分有效性；N 是有限的营养物质；W 是生物量；α_i 是转换率系数。

棉铃虫卵估值抽样模型

丁岩钦，陈玉平：棉田棉铃虫卵估值抽样的研究　生态学报，1985，5(2)

(1) 二阶抽样模型：

$$x^*=\alpha+\beta_1\bar{x}$$
$$x_i^*=\alpha+\beta_2\overline{x_i}$$
$$s^2=(\alpha+1)\bar{x}+(\beta_1-1)\bar{x}^2$$
$$s_i^2=(\alpha+1)\overline{x_i}+(\beta_2-1)\overline{x_i}^2$$

式中，β_1、β_2 分别为总体分布与初级单元分布的斜率；α 为公共截距。

(2) 序贯抽样的停止线方程：

$$T_n=\frac{\alpha+1}{D_0^2-\dfrac{1}{N}\left[\dfrac{\beta_1(\beta_2-1)}{\beta_2}+\dfrac{\beta_1-\beta_2}{\beta_2}m\right]}$$

式中，T_n 为累积卵总数；N 为 $n\times m$；n 为棉株数；m 为叶蕾数；D_0 为精确度；其他同上。

昆虫发育起点温度估值模型

李超：昆虫发育起点温度估值的一种新方法　生态学报，1985，5(2)

(1) 优选法估计昆虫发育起点温度的目标函数模型：

$$f(T_0)=\sqrt{\frac{n^2\sum_{i=1}^{n}k_i^2-n(\sum_{i=1}^{n}k_i)^2}{(n-1)(\sum_{i=1}^{n}k_i)^2}}$$

式中，$k_i=N_i(T_i-T_0)$；N_i、T_i 分别为第 i 个处理的平均历期和环境温度；T_0 为起点温度；n 为温度处理数。

(2) 有效积温模型：

$$K=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}N_i(T_i-T_0)$$

密度依赖性规律模型

Hugh J. Barclay：宿主－拟寄生物动力学－密度依赖性的位置影响　Ecological Modelling, 1986, 32

(1) 宿主密度依赖性规律模型：

$$N_{t+1}=\lambda N_t\exp(-gN_t)\exp(-aP_t)$$

$$P_{t+1}=N_t\left[1-\exp(-aP_t)\right]$$

式中，N_t 和 P_t 分别是在时间 t 时宿主和拟寄生物的数量；λ 是宿主每代的增加率；g 是密度依赖性衰减参数；a 是拟寄生物的宿主侵袭率。

(2) 拟寄生物密度依赖性规律模型：

$$N_{t+1} = \lambda N_t \exp(-aP_t)$$

$$P_{t+1} = N_t \exp(-gP_t)[1 - \exp(-aP_t)]$$

(3) 特定的积极平衡是：

$$\hat{N} = \frac{[\lambda \exp(1+g/a)]\ln(\lambda)}{a(\lambda-1)}$$

$$\hat{P} = \frac{\ln \lambda}{a}$$

在树木个体中基于碳吸收和分配的立地生长模型

Mäkelä A, Hari P：在树木个体中基于碳吸收和分配的立地生长模型 Ecological Modelling, 1986, 33

(1) 树木的位置指数 $I_{p,i}$：

$$I_{p,i} = \frac{\int_0^{h_i} P_{LR}(x)\rho_i(x)\mathrm{d}x}{A_{ni}}$$

式中，$P_{LR}(x)$ 是在点 x 处和在一个没有遮蔽的参考点处每年物种光合作用的比值；$\rho_i(x)$ 是在高度 x 处树种 i 的针叶面积分布；A_{ni} 是植冠的总针叶面积；x 是高度；h_i 是树种 i 的高度。

(2) 树木的每年光合作用生产：

$$P = P_0\int_l^h P_{LR}(x)\rho(x)\mathrm{d}x$$

式中，P_0 是物种植冠上方的光合作用率；$\rho(x)$ 是在垂直层 x 处的针叶面积密度。

(3) 一棵树的死亡：

$$\gamma = \begin{cases} \dfrac{-\Delta W_n}{G}\gamma_0 & (\Delta W_n < 0) \\ 0 & (\Delta W_n > 0) \end{cases}$$

式中，γ 是将要被去掉的树种类部分；ΔW_n 是总生长过程 G 中针叶生物量的变化；γ_0 是参数，针叶净生长相对于总生长的下降代表一个加速死亡过程。

地上净生产量估算模型(P_{an})

Lauenroth W K, Hunt H W, Swift D M et al：草原地上净初级生产量估算——一个仿真方法 Ecological Modelling, 1986, 33

$$P_{an} = \sum_{t=1}^{n}\Delta B(t)$$

式中，$\Delta B(t)$ 是从时间 1 到 n 的每个时间间隔 t 的地上生物量的变化，其计算公式可表达为：

$$\Delta B(t) = \Delta P(t) - \Delta R(t) - \Delta G(t) - \Delta D(t) - \Delta C(t)$$

式中，ΔP 是粗光合作用；ΔR 是地上呼吸作用；ΔG 是地下迁移；ΔD 是死亡和分散；ΔC 是消耗。

棉铃虫卵及幼虫阶段的计算机模型

李超：棉铃虫卵及幼虫阶段动态的一个计算机模型 生态学报，1986，6(1)

$$n_{i,j}^{(t+1)} = \begin{cases} \text{卢卵} & (i=0;\ j=1) \\ \sum_{l=1}^{k} n_{i-1,l}^{(t)} f_{i-1,l} & (i=1,2,\cdots,7(7\text{代表蛹});\ j=1) \\ n_{i,j-1}^{(t)} S_{i,j-1} & (i=0,1,\cdots,6;\ j=2,3,\cdots,k) \end{cases}$$

式中，$n_{i,j}^{(t)}$ 为处于第 i 虫态第 j 天年龄的昆虫数量；f_{ij} 为处于第 i 虫态的昆虫与第 j 天年龄完成本阶段发育而在下一天进入下一虫态的比例；$S_{i,j}$ 为处于第 i 虫态第 j 天年龄的昆虫在下一天未完成本阶段的发育但存活的比例。

种子发芽起点温度 C 及有效积温 K 指数

钱希：苏北麦田杂草与温度关系的初步观察及其防除问题 生态学报，1986，6(1)

$$C = \frac{\sum V^2 \sum T - \sum V \sum VT}{n\sum V^2 - (\sum V)^2}$$

$$K = \frac{n\sum VT - \sum V \sum T}{n\sum V^2 - (\sum V)^2}$$

式中，V 为发育速率；T 为平均观察温度；n 为处理项目数。

发育起点温度 C 和有效积温 $\overline{K}$ 指数

李本珍，赵季秋，李典谟等：棉花伏蚜发育起点有效积温及生殖频率的年龄分布的研究 生态学报，1986，(3)

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_i D^2 - \overline{D}\sum_{i=1}^{n} D_i T_i}{\sum_{i=1}^{n} D_i^2 - n\overline{D^2}}$$

$$\overline{K} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} K_i$$

式中，T 为环境温度；D 为发育历期；$\overline{D}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}D_i$

湖鲚生长特征和临界年龄模型

唐渝：太湖湖鲚生长特征和临界年龄的研究．生态学杂志，1986，5(3)

(1) 生长方程：

$$W_t = W_\infty[1-e^{-k(t-t_0)}]^3$$

$$L_t = L_\infty[1-e^{-k(t-t_0)}]$$

式中，W_t，L_t 分别为 t 龄时的体重和体长；W_∞，L_∞ 分别为渐近体重和渐近体长；k 为生长曲线的平均曲率；t 为年龄；t_0 为体长、体重为零时的理论年龄。

(2) 生长速度模型：

$$\frac{dW}{dt} = 3W_\infty ke^{-k(t-t_0)}[1-e^{-k(t-t_0)}]^2$$

$$\frac{dL}{dt} = kL_\infty e^{-k(t-t_0)}$$

(3) 生长加速度模型：

$$\frac{d^2W}{dt^2} = 3W_\infty k^2e^{-k(t-t_0)}\times[1-e^{-k(t-t_0)}][3e^{-k(t-t_0)}-1]$$

$$\frac{d^2L}{dt^2} = -k^2L_\infty e^{-k(t-t_0)}$$

(4) 临界年龄 T 模型：

$$T=\frac{kt_0-\ln M+\ln(3k+M)}{k}$$

式中，M 为瞬时死亡率。

再次改进的 IWAO 模型

于秀林、任毓佐：再次改进的 IWAO $\overset{*}{M}$ - M 模型．生态学报，1986，6(3)

$$\overset{*}{M} = \alpha' + \beta' m - \gamma' m^2 + \delta m^3$$

式中，α' 为每个基本成分中个体数分布的平均拥挤度；β' 为在低密度下基本成分的相对聚等度；$\gamma'-2m$ 为基本成分的相对聚集度随种群密度而变化的速率；2δ 为基本成分的相对聚等度随种群密度而变化的加速率

降雨量的即时和延迟影响模型

Swendsen M M：降水量对挪威云杉(云杉属，冷杉，喀斯特地区)半径的增加和鳞翅类害虫动力学的影响．The Journal of Applied Ecology，1987，24

从 1964 到 1984 年的耕地数据，表示 4 到 7 个群丛的覆盖度的增加的描述方程：

$$I = I_{max}[1-e^{-a(P'-P'_{min})}]$$

式中，I 表示当前年轮指数；a 是一个常数；P' 是 5 月到 9 月累积的降水量；I_{max} 是 I 的最大值；当降水量小于等于 P'_{min} 时，I 变成零；$P'=P_i+0.50P_{i-1}+0.33(P_{i-2}+P_{i-3}+P_{i-4})$，$i$ 表示当前年份

规模分布的 Sinko 和 Streifer 方程

DeAngelis D L, Huston M A：植物和动物规模分布形式模型中生长率的影响．Ecological Modelling，1987，36

$$\frac{\partial f}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial s}[v(s,t)f] = -Z(s,t)f+P(s,t)$$

式中，$f(s,t)$ 是规模密度函数；$v(s,t)$ 是生长率；$Z(s,t)$ 是生物体死亡率；前三者都依赖于规模 s 和时间 t；$P(s,t)=\begin{cases}\delta(t)F(s) \text{ 或}\\ \delta(s-s_0)B(t)\end{cases}$，依赖于在繁殖季节遵从繁殖周期或者繁殖率 $B(t)$ 的初始规模密度函数 $F(s)$ 是否被赋值，函数 $\delta(t)$ 和 $\delta(s-s_0)$ 是迪拉克 delta-函数，$\delta(t)$ 表示 $F(s)$ 是一个在时间 $t=0$ 时的初始状态，$\delta(s-s_0)$ 表示群体中被繁殖的个体开始时的规模是 $s=s_0$。

活力指数

Swendsen M M：挪威云杉(云杉属，冷杉，喀斯特)的活力指数．The Journal of Applied Ecology，1987，24

当前年份每棵树的活力指数：

$$BA_1/SA=\frac{Dr_1-r_1^2}{DS-S^2}$$

式中，D 是胸高直径(dbh)；r_1 是当前每个年轮的宽度；S 是胸高部位的边材部分的测量半径(两个相对中心的平均值)。

芒萁植株浸出液对几种植物生长影响的检验模型

叶居新，洪瑞川，聂义如等：芒萁植株浸出液对几种植物生长的影响．植物生态学与地植物学学报，1987，11(3)

(1) 芒萁浸出液对种子发芽数量的影响——Z 检验模型：

$$Z = \frac{|P - P'|}{\sqrt{\frac{S^2}{N} + \frac{S^2}{N'}}}$$

$$S^2 = P''(100 - P'')$$

$$P'' = \frac{A + A'}{N + N'} \times 100$$

式中，P 为未处理组的种子死亡百分率；P' 为处理组的种子死亡百分率；N 为未处理组播种数；N' 为处理组播种数；A 为未处理组的发芽数；A' 为处理组的发芽数。

(2) 芒萁浸出液对幼芽生长的影响——t 检测模型：

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}}$$

$$S_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2} = \sqrt{\frac{S_e^2}{n_1} + \frac{S_e^2}{n_2}}$$

$$S_e^2 = \frac{\sum x_1^2 - \frac{(\sum x_1)^2}{n_1} + \sum x_2^2 - \frac{(\sum x_2)^2}{n_2}}{n_1 + n_2 - 2}$$

生物个体的代谢模型

陆健健：能量生态学(四)：生物个体的代谢能量．生态学杂志，1987，6(6)

(1) 环境温度与生物代谢率的关系——温度系数 Q_{10} 模型：

$$Q_{10} = \left(\frac{K_1}{K_2}\right)^{10/(t_1 - t_2)}$$

式中，Q_{10} 为温度系数，即为耗氧量在气温升高 10℃ 时的增加率；t_1 和 t_2 分别为不同的环境温度；K_1 和 K_2 分别为温度 t_1 和 t_2 时的耗氧量。

(2) 个体大小与代谢率的关系——代谢率 M 模型：

$$M = aW^b$$

式中，W 为体重；b 为指数；a 为比例常数。

冠层的光合作用模型

Running S W, Nemani R R：模拟的不同气候下森林光合作用与蒸发与 AVHRR 植被指数的季节模式的关系研究．Remote Sensing of Environment, 1988, 24

$$N_{ps} = [(S_{CO_2} K_1 K_M)/(K_1 + K_M)] I_{la} I_{day}$$

式中，N_{ps} 是冠层日光合作用率；S_{CO_2} 是 CO_2 从叶到空气的扩散梯度；K_1 是冠层水蒸气传导率× 0.64，K_M 是叶肉中 CO_2 传导率；I_{la} 是叶面积指数；I_{day} 是白昼长度。

最佳生长方程

Dale V H, Jager H I, Gardner R H et al：利用灵敏度和不确定性分析来改善大尺度森林发展情况预测．Ecological Modelling, 1988, 42

$$\frac{d(D_{bh}^2 H)}{dt} = RA_1\left(1 - \frac{D_{bh}H}{D_{bhmax}H_{max}}\right)$$

式中，D_{bh} 是当前投影直径；H 是树的高度；R 是常数生长率参数；A_1 是树木的叶面积；D_{bhmax} 和 H_{max} 是物种的最大直径和高度。

$$H = 137 + b_2 D_{bh} - b_3 D_{bh}^2$$

式中，137cm 是通常用来测量树木直径的高度；

$b_2 = 2(H_{max} - 137)/D_{bh\,max}$；

$b_3 = (H_{max} - 137)/D_{bh\,max}^2$；

$$\frac{dD_{bh}}{dt} = \frac{\frac{GD_{bh}(1 - D_{bh}H)}{D_{bhmax}H_{max}}}{274 + 3b_2 D_{bh} - 4b_3 D_{bh}^2}$$，G 是参数。

预测树冠叶面积指数

Nizinski J J, Saugier B：成熟栎树林的树叶发芽和发育模型．The Journal of Applied Ecology, 1988, 25, 643-652

某天的叶面积指数(I_{lad})：

$$I_{lad} = \left(I_{lamax}\sum_{db}^{d} T_a\right)/[4.1(983 - D_d)]$$

式中，I_{lamax} 是最大叶面积指数；T_a 是周围环境温度；db 是发芽期；总热量是在发芽期 db 和日期 d 之间；D_d 是日期 d 的白昼长度。

浮游动物生物量模型

陈亚瞿：东海大陆架外缘和大陆坡深海渔场浮游动物研究 I．生物量．生态学报，1988，8(2)

$$Y = a'e^{-kz}$$

式中，Y 为生物量；Z 为深度；a' 为常数；k 为减少系数。

净第一性生产力模型

胡自治，孙吉雄，张映生等：高山线叶蒿草草地的第一性生产和光能转化率 生态学报，1988，8(2)

$$P_n = \Delta B + L + G$$

式中，ΔB 为 $t_1 - t_2$ 期间现存量的增量；L 为凋落物量；G 为动物牧食量。

存活率(或卵化率)y 模型

王智翔，陈永林，马世骏：温、湿度对狭翅雏蝗 *Chorthippus dubius* (Zub.)实验种群的影响 生态学报，1988，8(2)

$$y = a + b_1(T' - T)(T - T_0) + b_2(H' - H)(H - H_0) + b_3\left(\frac{H'}{T_0} - \frac{H}{T}\right)\left(\frac{H}{T} - \frac{H_0}{T'}\right) + b_4(H'T' - HT)(HT - H_0T_0)$$

式中，H'、H_0 和 T、T_0 分别为昆虫可存活的湿度的上、下限和温度的上、下限；T，H 为实际温、湿度；a、b_1，b_2、b_3 和 b_4 均为常数。

棉花生长发育模拟模型

吴国伟，程选荣，李典谟等：棉花生长发育模拟模型的研究 生态学报，1988，8(3)

(1) 光能日辐射量模型：

$$Q = Q_A(a + bS) \times 0.4838$$

式中，Q 为太阳辐射日总量；Q_A 为天文辐射日总量；a、b 为常数；S 为日照百分率。

(2) 光合与呼吸作用及干物质分配：

1) 单位时间内的净光合产物 $\frac{dW}{dt}$ 模型：

$$\frac{dW}{dt} = \frac{P(1 - R_1) - R_0W}{1 + R_g}$$

式中，P 为表观光合作用；R_1 为光呼吸系数；R_0，R_g 为常数；W 为棉株干重。

2) 干物质分配——单铃重 BW 模型：

$$BW = \frac{8.2942}{1 + e^{5.2701 - 0.0073T_p}}$$

式中，T_p 为生理时间。

转移概率模型

阳含熙，潘愉德，伍业钢：长白山阔叶红松林马氏链模型 生态学报，1988，8(3)

$$P_{ij} = \begin{cases} R_{ij}T_m & (i \neq j) \\ R_{ij}T_m + T_s & (i = j) \end{cases}$$

或 $$P_{ij} = \frac{\text{在种}i\text{林冠下种}j\text{断面积之和}}{\text{在种}i\text{林冠下全部种段面积之和}}$$

式中，P_{ij} 为种 i 为种 j 代替的转移概率；T_s，T_m 分别为四十年后种的存活率和死亡率，两者之和为 1；$R_{ij} = \frac{\text{种}i\text{林冠下种}j\text{的幼树株数}}{\text{种}i\text{林冠下所有种幼树的总株数}}$，为主林层内各主要种为其林冠下幼树和小径木更替的比例。

杉木火力楠混交林的气候效应模型

曾士余，陈楚莹等：杉木火力楠混交林的气候效应 生态学杂志，1988，7(6)

(1) 太阳辐射能 Q 模型：

$$Q = I_0(u\sin\delta + v\cos\delta\cos t + \sin\beta\sin\alpha\cos\delta\sin t) + D$$

$$u = \sin\varphi\cos\alpha - \cos\varphi\sin\alpha\cos\beta$$

$$v = \cos\alpha\cos\varphi + \sin\varphi\sin\alpha\cos\beta$$

式中，I_0 为太阳直接辐射强度；φ 为观测点地理纬度；δ 为观测时的太阳赤纬；t 为观测时的太阳时角；D 为天空辐射强度；α，β 分别为坡度和坡向。

(2) 光能利用率 $R(\%)$ 模型：

$$R(\%) = \frac{\sum W_iF_i}{Q \cdot 1000} \times 100$$

式中，W_i 为各器官净生产量；F_i 为各器官的热值；Q 为总辐射。

叶片相对水分含量(R_{WC})指数

Bowman W D：叶片水分状况、气体交换及光谱反射系数之间的关系 Remote Sensing of Environment, 1989,30

$$R_{WC} = (m_1 - m_d)/(m_t - m_d)$$

式中，m_1，m_d 和 m_t 分别是反射系数测量时、干燥后及水分完全饱胀时的叶片质量。

生产力定量化的营养指数计算模型

Nobel P S：龙舌兰和仙人掌的生产力定量化的营养指数 Journal of Applied Ecology, 1989, 26

(1) 氮指数：

氮指数用来定量化 24 小时中氮对二氧化碳净吸

收量的影响：

$$氮指数 = \frac{1 + n_N \ln N_{new}}{1 + n_N \ln N_{orig}}$$

式中，n_N 是氮系数；N_{new} 和 N_{orig} 表示新的和原先的生境的土壤氮水平。

(2) 钾指数：

$$钾指数 = 1 + 0.117 \ln(K/250)$$

式中，K 是土壤中钾的水平。

(3) 硼指数：

$$硼指数 = B^{0.213}$$

式中，B 表示土壤中的硼水平。

(4) 钠指数：

$$钠指数 = 1 - 0.00288\,Na$$

式中，Na 是土壤中的钠水平。

(5) 营养指数(I_n)：

$$I_n = (1.418 + 0.348 \ln N)[1 + 0.195 \ln(P/60)] \times [1 + 0.117 \ln(K/250)] B^{0.213} (1 - 0.0028 Na)$$

式中，N 是百分数表示的干物质；P、K、B 和 Na 是 $Mg \cdot g^{-1}$ 表示的干物质。

最大直径增长方程

Moore A D：应用在森林间距仿真模型中的最大生长率方程。Ecological Modelling, 1989, 45

$$\frac{dD}{dt} = \frac{GD(1 - H/H_{max})}{274 + 3b_2 D - 4b_3 D^2}$$

式中，D 和 H 分别表示树的胸高直径和高度；H_{max} 是树的最大高度；t 是时间；G 是参数。

发育与温度的关系模型

马万炎，彭建文，王溪林等：黑侧沟姬蜂的生物学及种群消长规律研究。生态学报，1989，9(1)

(1) 发育起点温度模型：

$$C = \frac{\sum f \sum (fNT) - \sum (fN) \sum (fT)}{\sum f \sum (fN^2) - \left[\sum (fN)\right]^2}$$

(2) 有效积温模型：

$$K = \frac{\sum (fN^2) \sum (fT) - \sum (fN) \sum (fNT)}{\sum f \sum (fN^2) - \left[\sum (fN)\right]^2}$$

(3) 发育起点温度的标准差模型：

$$S_t = \sqrt{\frac{\sum (T - T')^2}{n - 1}}$$

式中，T 为观察温度；T' 为计算温度；n 为总积温分组数。

关于变温促进发育的酶学解释模型

王智翔，陈永林：变温促进昆虫发育的酶学解释。生态学报，1989，9(2)

(1) 在 T_1、T_2 两点变温下，发育速率模型：

$$R_{var}(T_1, T_2) = \frac{1}{2} R_e(T_1) + \frac{1}{2} R_e(T_2)$$

(2) 相应恒温下的发育速率模型：

$$R_{con}(T_1, T_2) = \frac{1}{2} R_e(T_1) + \frac{1}{2} R_f(T_2)$$

根据酶学推倒，有 $R_e(T_2) > R_f(T_2)$，因此 $R_{var}(T_1, T_2) > R_{con}(T_1, T_2)$，所以变温能够促进发育。

发育速率 $V(T)$ 模型

戴志一，祝树德，张风举：温度对侧多食跗线螨发育和种群增长的影响。生态学报，1989，9(4)

$$V(T) = \frac{\rho(25°C) \dfrac{T}{298} \exp\left[\dfrac{\Delta H_A^{\neq}}{R}\left(\dfrac{1}{298} - \dfrac{1}{T}\right)\right]}{1 + \exp\left[\dfrac{\Delta H_L}{R}\left(\dfrac{1}{T_{\frac{1}{2}L}} - \dfrac{1}{T}\right)\right] + \exp\left[\dfrac{\Delta H_H}{R}\left(\dfrac{1}{T_{\frac{1}{2}H}} - \dfrac{1}{T}\right)\right]}$$

式中，$\rho(25°C)$ 为酶未失活状况下 25℃时变温动物的发育速率；$\Delta H_A^{\neq}$ 为活化焓；ΔH_H，ΔH_L 分别为与酶的高温和低温失活有关的焓的变化；$T_{\frac{1}{2}L}$，$T_{\frac{1}{2}H}$ 分别为控制酶处于 1/2 高温和 1/2 低温失活状况下的温度；R 为气体常数；T 为绝对温度。

油松毛虫幼虫抽样模型

夏乃斌，屠泉洪，马占山：油松毛虫幼虫抽样技术的研究。生态学报，1989，9(4)

(1) 理论抽样数模型：

$$n = t_a^2 a m^{b-2} / D^2$$

式中，t_a 为 t 分布值；a、b 为 Taylor 幂法则参数；D 为相对误差。

(2) 回归方程：

$$Y = b_0 + \sum_i b_i X_i$$

式中，X_i 为油松由下向上各轮的虫口数；Y 为整株虫口数

改进的 IWAO 抽样模型

徐汝梅，刘来福，丁岩钦：改进的 Iwao $\dot{M}-M$ 模型的抽样方法　生态学报，1989，9(4)

$$Q = \frac{t^2}{D^2}\left[\frac{\alpha'+1}{m} + (\beta'-1) + \gamma m\right]$$

式中，α' 为每个基本成分中个体数分布的平均拥挤度；β' 为在低密度下基本成分分布的相对聚集度；r 为基本成分分布的相对聚集度随种群密度而变化的速率。

棉铃虫预测的回归模型

倪焱：应用灰色系统理论对二代棉铃虫进行预测　生态学杂志，1989，8(5)

$$\hat{Y}_t = b\gamma_{0t} + a$$

式中，$\hat{Y}_t$ 为拟合预测值；a，b 为拟合参数；γ_{0t} 为关联度。

丹顶鹤雏鸟生长发育模型

李金录，程彩云，金暖等：丹顶鹤雏鸟生长发育的研究　生态学报，1990，10(2)

(1) 生长曲线——Logistic 方程：

$$W_t = \frac{K}{1+e^{a+rt}} \quad (r\text{取负值})$$

式中，W_t 为 t 日龄的重量或长度；K 为最终重量或长度曲线平稳阶段的渐近线；a 为平移时间 t 的坐标轴至零的常数；e 为自然对数的底；r 为与整个生长率成正比的常数。

(2) 绝对生长率模型：

$$\frac{dW}{dt} = -rW_t\left(1-\frac{W_t}{K}\right)$$

(3) 相对生长率模型：

$$\frac{1}{W_t}\frac{dW}{dt} = -rW_t\left(1-\frac{W_t}{K}\right)$$

Weibull 函数

刘树生，孟学多：昆虫发育历期分布的模拟研究　生态学报，1990，10(2)

$$F(x) = 1 - \exp\left\{-\left[(x-\gamma)-\eta\right]^{\beta}\right\}$$

式中，$F(x)$为常态历期 x 时完成发育的个体比例(0~1)；γ、η 和 β 为常数。

GM(1.1)模型

屠泉洪，夏乃斌，邵海荣：油松毛虫发生的灰色预测模型　生态学报，1990，10(3)

$$\frac{dX^{(1)}(t)}{dt} + aX^{(1)}(t) = u, \quad X^{(1)}(0) = X^{(1)}(1)$$

解的形式为：

$$X^{(1)}(t) = \left[X^{(1)}(0) - \frac{u}{a}\right]e^{-at} + \frac{u}{a}$$

式中，$X^{(1)}(t)$为 t 时间内上树平均虫口数的一次累加序列；a 为参数项量。

CO_2 交换测量模型

Bartlett D S, whiting G J, Hartman J M：利用植被指数估计草地冠层的太阳辐射拦截和净二氧化碳交换　Remote Sensing of Environment, 1990, 30

在植被表面与大气间的生态系统净 CO_2 交换(N_{EE})可表示为：

$$N_{EE} = G_P - (C_R + S_F)$$

式中，G_P 是总的光合作用率；C_R 是冠层呼吸作用率，S_F 是土壤通量。

$$N_{EE} = \varepsilon G_{IPAR} P_{AR0}$$

式中，P_{AR0} 是总的入射光合作用有效辐射；G_{IPAR} 是绿色叶片拦截的 P_{AR} 比例(%)；ε 是拦截 P_{AR} 转换为净 CO_2 交换的效率。

温度对萝卜蚜种群参数的影响模型

赵惠燕，汪世泽：温度对萝卜蚜种群参数影响的研究．生态学报，1990，10(3)

(1) 温度对萝卜蚜发育速率的影响：

变温动物发育速率的模拟模型：

$$V(t) = K/\{1+\exp[-r(T-T_0)]\}\cdot\{1-\exp[-(T-T_1)/\delta]\}\cdot\{1-\exp[-(T_h-T)/\delta]\}$$

式中，K 为高温下的潜在的饱和发育速率；r 为发育

速率随温度变化的指数增长率；T_l，T_h 各为最低、最高临界发育温度；T_0 为最适温度；δ 为边界层宽度。

(2) 温度对萝卜蚜存活率的影响：

存活率模型：

$$P(x,T)=\exp\left\{-\left[x/(a_1+a_2T+a_3T^2)\right]^{a_4+a_5T+a_6T^2}\right\}$$

式中，$P(x,T)$ 为在 T 温度下，x 年龄时的存活率；a_i 为常数。

(3) 温度对萝卜蚜生殖量参数的影响：

繁殖量模型：

$$F(t)=A(t-\alpha)^{\beta-1}\exp[-(t-\alpha)^{\beta}/\gamma]$$

式中，t 为时间；A 为面积参数；α 为位置参数；β 为形状参数；γ 为速度参数。

鳙鱼生长规律模型

王东、田见龙：诡水水库鳙鱼生长规律的研究. 生态学报，1990，10(4)

(1) 回归模型：

1) 体长 L 模型：

$$L=a+bR+cR\sin(R+10)$$

2) 体重 W 模型：

$$W=aL^b$$

式中，R 为鳞长；a、b、c 均为常数。

(2) 生长指标：

生长指标 D_i 模型：

$$D_i=L_i(\ln L_{i+1}-\ln L_i)$$

式中，L_i 为第 i 龄鱼的体长。

新的养分效应数学模型

从容：新的养分效应数学模型——对 Mitsherlich 方程的补充. 生态学报，1991，11(4)

(1) Mitsherlich 方程：

$$y=A(1-e^{-c_1x})$$

式中，c_1 为效应系数。

(2) 新模型：

$$y=A(1-Ie^{-cx+ax^2})$$

式中，$c=c_1-a'x$，$a=a'/2$；$I=A_0/A$；$A_0=A-y_0$；x 为养分量；y 为相应的实际产量。

森林植冠水分截留蒸发作用的直接测量模型

Teklehaimanot Z. Jarvis P G: 森林植冠水分截留蒸发作用的直接测量. Journal of Applied Ecology, 1991, 28

(1) 潮湿植冠的蒸发率(E_W)：

$$E_W=M\rho_a[e^*(T_s)-e_a]g_{at}/P$$

式中，$e^*(T_s)$ 是植冠表面温度下的饱和水汽压；e_a 是植冠上某个参考平面上的大气中的水汽压；g_{at} 是每棵树的界面层导通率；ρ_a 是大气密度；P 是大气压力；M 是水和空气的分子重量的比值。

(2) 潮湿和部分潮湿植冠的蒸发作用：

当植冠上的水量 $C>S$ 时，植冠完全湿透，实际蒸发率 C 是单位时间内残留在植冠上的水量，S 是植冠的储存能力；E_W 等于蒸发率 E_p，它是由 Penman 方程计算得到的，即：

$$E_p=M\rho_a g_{at}D/(\varepsilon+1)P$$

式中，D 是水汽压差额；ε 是饱和大气的潜热容量增加值与热函容量增加值的比值：

当 $C<S$，Rutter 等人(1971)假定使植冠部分变湿的蒸发率可以估算为：

$$E_e=E_pC/S$$

大气中的 CO_2、气候变化和树木生长之间的过程模型

Webb W L：大气中的 CO_2、气候变化和树木生长-过程模型 Ⅰ 模型结构. Ecological Modelling, 1991, 56

(1) 蒸腾作用模型：

$$T_s=(\rho C_p/LP_s)[(E_s-E_a)/(R_s+R_b+R_c)]$$

式中，T_s 是蒸腾作用；ρ 是湿气的密度；C_p 是湿气的比热；L 是水蒸气的潜热；P_s 是心理测量学的常数；E_s 是叶片气孔中的水汽压；E_a 是大气中的水汽压；R_s 是气孔阻力；R_b 是边界层阻力；R_c 是表皮阻力。

$$T_s=0.054[V_{PD}/(R_s+R_b+R_c)]$$

式中，V_{PD} 是水汽压的差额。

1) Douglas-杉树的气孔通量：

$$C_{PMS}=1-\{1/[1+100\cdot\exp(-0.25\cdot PMS)]\}$$

式中，C_{PMS} 是相对于植物水势的气孔通量；P_{MS} 是植物水势。

$$C_{VPD}=1-\{1/[1+800\exp(-11\cdot R_{VPD})]\}$$

式中，C_{VPD}是相对于V_{PD}的气孔通量；R_{VPD}是相对的V_{PD}

$$C_{PFD}=1-\exp(-0.017P_{FD})$$

式中，C_{PFD}是相对于P_{FD}的气孔通量；P_{FD}是光子通量密度。

$$C_{CO_2}=C_{PFD}-0.0005E_{CO_2}$$

式中，C_{CO_2}是相对于大气CO_2浓度的气孔通量；E_{CO_2}是叶片表面上大气中CO_2的浓度，单位是ppm。

$$C_{STOM}=C_{PMS}C_{VPD}C_{CO_2}$$

式中，C_{STOM}是相对气孔通量。

2) Douglas-杉树的光合作用：

氧化作用和羧化作用之间的比率：

$$O_2CO_2=[0.21\max_{VELO_2}(O_2/MICKO_2)]/[\max_{VEL}(CO_2/MICK_{CO_2})]$$

式中，$\max_{VELO_2}$是氧化作用的最大速度；$MICKO_2$是oxygen的米氏常数；$\max_{VEL}$是最大羧化作用速度；O_2是氧气的局部压力；CO_2是内部CO_2局部压力；$MICK_{CO_2}$是CO_2的米氏常数。

$$\max_{ELE}=C_{HL}A'\{\exp[B\cdot(T_{EMC}-H)]-\exp[B(T_{EMC}-H)]\}$$

式中，$\max_{ELE}$是微当量中的最大电子传输；C_{HL}是Douglas-杉树树叶中的叶绿素含量；B和H是系数；T_{EMC}是温度；A'是当$T_{EMC}=H$时的最大电子传输率。

电子传输的潜在速率可表达为：

$$P_{ELE}=\{-[0.5(1-F)PFD+\max_{ELE}-Z]^2-SQR[0.5(1-F)PFD+\max_{ELE}+Z]^2\}-4[0.5(1-F)PFD\max_{ELE}]$$

式中，P_{ELE}是微当量中电子传输的潜在速率；F是P_{FD}中被叶片吸收而没有到达叶绿体的部分；Z是参数。

(2) 呼吸作用：

1) 生长呼吸与产量系数有关：

$$Y=\Delta W/(\Delta W+\Delta S_r)$$

式中，Y是产量；ΔW是生物量的变化；ΔS_r是呼吸作用的变化。

2) 温度对维持呼吸作用的影响：

$$RS_{MTH}=0.087\exp(0.067T_{EMC})$$

式中，RS_{MTN}是维持的呼吸作用

3) 生长呼吸作用为：

$$R_{SGRTH}=(R_{SMTN}-P_{HOTSYN})\times0.25$$

式中，GRTH是生长呼吸作用和可用的光合作用。

毛光合作用、气孔通量和呼吸作用等子模型的链接导出下面的净光合作用表达式：

$$P_{SNET}=(P_{SGROS}C_{STOM})-(R_{SMTN}-R_{SGRTH})$$

4) Douglas 杉树的碳分配：

$$\frac{dN_n}{dt}=a-cN_n+eT_r$$

$$\frac{dN_o}{dt}=b-dN_o+fT_r$$

$$\frac{dS_n}{dt}=cN_n-gS_n$$

$$\frac{dS_o}{dt}=gS_n+dN_o-hS_o$$

$$\frac{dT_r}{dt}=hS_o-eT_r-fT_r$$

式中，N_n是新针叶中的碳；N_o是老针叶中的碳；S_n是新茎中的碳；S_o是老茎中的碳；T_r是根中的碳；常数a和b是新针叶和老针叶的净光合作用输入。系数c,d,e,f,g和h是迁移系数。

SPESS–同龄自然稀疏纯林分的模拟器

Luis Soares Barreto：SPESS-同龄自然稀疏纯林分的模拟器

Ecological Modelling. 1991. 54

(1) Khimi-Hara 模型中给定年龄t的相对死亡率($R_{MR}(t)$)：

$$R_{MR}(t)=-c\ln(POF)\exp\{-c[t-t(0)]\}$$

式中，$t(0)$是林分进入3/2幂定律的年龄；c是Gompetrz曲线中的竞争系数；POF是年龄$t(0)$/渐近线的比率林分密度或者最终林分密度。

(2) 给定年龄t时的相对生长率($R_{GR}(t)$)如下：

$$R_{GR}(t)=-0.5R_{MR}(t)$$

(3) 已知DBH类型i在年龄t时的频率$fr(i,t)$，它

在年龄 $t+1$ 时的频率将是：

$$\mathrm{fr}(i,t+1)=\mathrm{fr}(i,t)(1+R_{\mathrm{MR}}(t))$$

森林对大气污染的反应模拟模型

Kremer R G：模拟森林对大气污染的反应——将对二氧化硫的生理反应和依赖于气候的生长过程结合起来。Ecological Modelling, 1991, 54

(1) 通过 FOREST-BGC 计算光合作用：

$$\mathrm{PSN}=[(S_{\mathrm{co}_2}C_{\mathrm{c}}C_{\mathrm{m}})/(C_{\mathrm{c}}+C_{\mathrm{m}})]I_{\mathrm{la}}L_{\mathrm{day}}$$

式中，PSN 是树冠光合作用；S_{CO_2} 是 CO_2 从大气到树叶的扩散梯度；C_c 是树冠对 CO_2 的通过率；C_m 是树冠叶肉通过率；I_{la} 是叶面积指数；L_{day} 是昼长。

$$C_{\mathrm{cw}}=C_{\mathrm{cmax}}-D_{\mathrm{ccw}}\cdot(L_{\mathrm{wp}}-L_{\mathrm{wp_{min}}})$$

式中，C_{cw} 是树冠树叶对水蒸气的通过率；$C_{c_{max}}$ 是树冠树叶对水蒸气的最大通过率；D_{ccw} 是 C_c 与 L_{wp} 的比值；L_{wp} 是每日最小叶片水势；$L_{wp_{min}}$ 是包括气孔关闭时的最小叶片水势。

(2) 维持消耗或者暗呼吸作用消耗：

$$R=a\exp(0.085T)C$$

式中，R 是树冠暗呼吸作用；a 是反应类型的实验比例因子；T 是夜晚的平均温度；C 是树叶区室中的碳储量。

热带森林的营养梯度和空间结构-模型

Boersma M, Schaik C P, Hogeweg P：热带森林的营养梯度和空间结构-模型研究 Ecological Modelling, 1991, 55

(1) 种子的有效性：

$$SA=\sum[\mathrm{SEED}_n(H_n/H_{\max,n})^2]+\mathrm{GLOB}$$

式中，SA 是一个物种的种子总量；SEED_n 是最大种子产量；H_n 和 $H_{\max,n}$ 分别是相邻植物的高度和最大高度；GLOB 是全球种子有效性。

(2) 营养不足引起的生长减缓：

$$r(N)=N/(N+K_{\mathrm{m}})$$

式中，$r(N)$ 是生长部分；N 是土壤中的营养；K_m 是饱和常数。

(3) 遮蔽引起的生长减缓：

$$r_{\mathrm{al}}=1.345[1.095-e^{-1.136(\mathrm{AL}-0.08)}]$$

式中，r_{al} 是最大生长率部分；al 是可用光。

(4) 死亡率：

$$P_{\mathrm{m}}=1-[1-4\,(A_{\max})^t]$$

式中，P_m 是年份 t 的死亡概率；A_{max} 是只有 2%的树木可以存活的树木年龄。

(5) 微分方程模型：

$$S_{\mathrm{h}}=a_{\mathrm{h}}NH/(K_{\mathrm{h}}+N)$$

$$S_{\mathrm{s}}=a_{\mathrm{s}}NS/(K_{\mathrm{s}}+N)$$

$$T_{\mathrm{d}}=(b_{\mathrm{h}}+c_{\mathrm{h}})H+(b_{\mathrm{s}}+c_{\mathrm{s}})S$$

$$PA=300-H-S$$

$$\mathrm{d}H/\mathrm{d}t=[S_{\mathrm{h}}/(S_{\mathrm{s}}+S_{\mathrm{s}})]A_{\mathrm{p}}-(b_{\mathrm{h}}+c_{\mathrm{h}})H-(dT_{\mathrm{d}}+e)(H/(H+S))$$

$$\mathrm{d}S/\mathrm{d}t=[S_{\mathrm{s}}/(S_{\mathrm{h}}+S_{\mathrm{s}})]A_{\mathrm{p}}-(b_{\mathrm{s}}+c_{\mathrm{s}})H-(dT_{\mathrm{d}}+e)(S/(H+S))$$

式中，下标 h 和 s 分别表示物种 Hoarder 和 Shedder；a 是种子的最大值；b 是衰老致死的树木的比例；c 是发育不足致死的树木比例；d 是砍伐致死的树木比例；e 是外界干扰致死的树木数量；S 是树木种群的总体种子有效性；T_d 是自然原因致死的树木总数；A_p 是空地的数量。

苹果棉蚜蚜小蜂生长发育过程模拟模型

唐业忠，赵万源，况荣平等：苹果棉蚜与苹果棉蚜蚜小蜂种间关系的模拟研究. 生态学报，1991，11(1)

(1) 发育历期和成虫寿命：

1) 发育速度 V 模型——Logistic 方程：

$$V=K/(1+e^{a-bT})$$

式中，T 为温度。

2) 苹果棉蚜成虫寿命 N 模型：

$$N=1.8679-0.0464T+0.0157h$$

式中，h 为相对湿度。

3) 发育历期的方差(S_S)模型：

$$S_{\mathrm{S}}=a_0-a_1T+a_2T^2$$

(2) 自然死亡率：

1) 苹果棉蚜死亡率模型：

$$R_{\mathrm{d}}=a-bT$$

2）苹果棉蚜蚜小蜂死亡率模型：

$$R_d = 2.3931 - 0.2115T + 0.0047T^2$$

(3) 生殖率：

苹果棉蚜成虫产仔率模型：

$$F(x) = \frac{1}{\Gamma\left(\frac{n-2}{2}\right)2^{\frac{n}{2}}}(x+x_1)^{(n-2)/n} - e^{(x+x_1)/2}N_S$$

式中，x 为时间；x_1 为时间平移系数；n 为自由度；N_S 为每雌一生的产仔数。

(4) 功能反应：

Holling 模型：

$$A_n = aTNt/(1+aT_hN_t)$$

式中，A_n 为寄生率；a 为瞬时攻击率；T_h 为处理时间；Nt 为蚜虫密度；T 为实验时间。

(5) 干扰反应：

Hassell 模型：

$$a = 0.2182P^{-0.7497}$$

式中，a 为攻击率；P 为天敌密度。

生存分析理论及其生命表格式模型

杨凤翔，王顺庆，徐海根等：生存分析理论及其在研究生命表中的应用．生态学报，1991，11(2)

(1) 生存分析的基本数学理论：

1）基本函数模型：

$$S(t) = P(T > t) = \int_t^{+\infty} f(u)\mathrm{d}u =$$

$$\exp - \int_{t_0}^{t} -\lambda(u)\mathrm{d}u \qquad (0 \leqslant t < \infty)$$

$$F(t) = P(T \leqslant t) = 1 - P(T > t) = 1 - S(t) = \int_0^t f(u)\mathrm{d}u$$

$$f(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P(t < T \leqslant t + \Delta t)}{\Delta t} = F'(t)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{S(t)} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}[\ln S(t)]$$

式中，t 为发育期；T 为存活期；$S(t)$为生存率函数；$F(t)$为积累死亡率函数；$f(t)$为死亡密度函数；$\lambda(t)$ 为危险率函数，这四者之间可以互算。

2）估计量模型：

$$\hat{S}_i = \hat{S}_{i-1}\hat{P}_i$$

$$\hat{F}_i = 1 - \hat{S}_i$$

$$\hat{f}(t_{mi}) = \frac{\hat{S}_{i-1}\hat{q}_i}{h_i} = \frac{1}{h_i}(1-\hat{P}_i)\hat{P}_{i-1}\cdots\hat{P}_1$$

$$\hat{\lambda}(t_{mi}) = \frac{d_i}{h_i(n_i - d_i/2)}$$

式中，q 为时刻 t 的瞬时死亡率；P 为 t 时刻继续存活的概率；n_i 为时刻 t_i 时存活的总数，且其中包括 d_i 个在 t_i 时刻死亡；$i = 1,2,3,\cdots,k$；$t_{mi} = \frac{1}{2}(t_{i-1} + t_i)$，$h_i = t_i - t_{i-1}$ 分别为第 i 个发育期的时间区间 $[t_{i-1}, t_i]$ 的中点和长度。

(2) 生命表：

1）方差估计模型：

$$Var(\hat{S}_i) = \hat{S}_i^2 \sum_{j=1}^{i} \frac{d_j}{n_j(n_j - d_j)}$$

$$Var(\hat{F}_i) = Var(\hat{S}_i)$$

$$Var[\hat{f}(t_{mi})] \approx [\hat{f}(t_{mi})]^2 \left(\frac{\hat{P}_i}{n_i\hat{q}_i} + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\hat{q}_j}{n_j\hat{P}_j} \right)$$

$$i = 1,2,3,\cdots,k$$

$$Var[\hat{\lambda}(t_{mi})] \approx [\hat{\lambda}(t_{mi})]^4 \frac{h_i^2 \hat{P}_i}{n_i\hat{q}_i^3}$$

2）生存期的估计量模型：

$$\hat{\mu} = \int_0^{\infty} \hat{S}(t)\mathrm{d}t \approx \sum_{i=1}^{k} \hat{S}(t_{mi})h_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{\hat{f}(t_{mi})}{\hat{\lambda}(t_{mi})}h_i$$

Holling Ⅱ 功能反应模型

古德就，余明恩，侯任环等：农药亚致死剂量对菜蚜茧蜂搜索行为影响的研究．生态学报，1991，11(4)

$$y = \frac{T_t ax}{1 + abx}$$

或

$$y/x = T_t a - aby$$

式中，T_t 为总的时间；a 为寄生蜂搜索效应；b 为寄生蜂处理寄主所花费的时间；x 为寄主密度；y 为被寄生的寄主个体数，即寄主密度；y/x 表示被寄生率。

温度与发育速率关系模型

李代芹，赵敬钊：温度对三突花蛛发育存活与生殖影响的模型化研究．生态学报，1991，11(4)

$$V(T) = \frac{K\left[1 - \exp\left(-\frac{T - T_L}{\delta}\right)\right] \times \left[1 - \exp\left(-\frac{T_H - T}{\delta}\right)\right]}{1 + \exp(-r(T - T_0))}$$

式中，K 为常数；T_H、T_L 为温度上下限；T_0 为最适温度；δ 为对高低温的忍受宽度。

速生长量 V_{gc} 指数

李淑琴，张纪林，肖开生：木兰科树种幼树生长特性的研究 植物生态学与地植物学学报，1991，15(4)

$$V_{gc}=\frac{bKe^{a-bt}}{\left(1+e^{a-bt}\right)^2}(t_2-t_1)$$

式中，(t_2-t_1) 为时间特征值(Δt)；$\frac{bKe^{a-bt}}{\left(1+e^{a-bt}\right)^2}$ 为速度特征值 $[V_{(t)}]$；当 $t=t'=\frac{a}{b}$ 时，$V_{(t)}=\frac{bK}{4}$，则：$V_{gc}=V_{(t)}\cdot\Delta t=\frac{bK}{4}(t_2-t_1)$。

水草对土壤、水分和磷的保持值计算公式

Kumar R, Ambasht R S, Srivastava N K：在土壤、水分和磷的运移中 5 种常见水草的保持作用。Journal of Applied Ecology, 1992, 29

$$\text{保持值}=100\left(1-\frac{S_p}{S_o}\right)$$

式中，S_p 和 S_o 分别是在相同侵蚀压力下，从植被覆盖的和光秃的地区流失的土壤、水分和磷的数量。

改进的叶生理模型

Sellers P J, Berry J A, Collatz G J et al：冠层反射率，光合作用及蒸发 Ⅲ 利用改进叶模型及新的冠层积分方法的重新分析 Remote Sensing of Environment, 1992, 42

(1) 受生化酶限制的同化作用的速率 w_c 表示为：

$$w_c=V_m\frac{C_i-\Gamma^*}{C_i+K_c(1+O_2/K_o)}$$

式中，w_c = 同化作用的 Rubisco 受限速率(μ mol·m^{-2}·s^{-1})；V_m = Rubisco 最大接触反应量(μ mol·m^{-2}·s^{-1})；C_i = CO_2 叶内浓度(Pa)；O_2 = O_2 叶内分压(Pa)；Γ^* = CO_2 补偿点(Pa)；K_c = CO_2 的 Michanelis-Menten 常数(Pa)；K_o = O_2 的抑制常数(Pa)。

(2) 同化作用的光限制速率 w_e 公式

$$w_e=(\boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{n})\varepsilon(1-\omega_v)\frac{C_i-\Gamma^*}{C_i+2\Gamma^*}$$

式中，$\boldsymbol{F}$=(矢量) PAR 的通量；$\boldsymbol{n}$ =叶面法向单位矢量；w_e =同化作用的光受限速率(μmol·m^{-2}·s^{-1})；ε = CO_2 吸收的固有量子效率(μmol·μmol^{-1})；其他同上。

(3) 第三个限制速率 w_s 是光合作用产物的输出或利用容量，估计表达式为：

$$w_s=V_m/2$$

观察表明从一个限制速率向另一个限制速率的转换并不是瞬时，而是在三个过程间耦合起来形成一个光滑曲线，这些速率项可组合为两个二次方程，然后找出其较小的解：

$$\theta w_p^2-w_p(w_c+w_e)+w_ew_c=0$$

$$\beta A^2-A(w_p+w_s)+w_pw_s=0$$

式中，A= 为同化作用速率；θ,β= 耦合系数；$w_p=w_c$ 和 w_e "光滑"的极小值。

(4) Ball (1988)给出了叶气孔阻力的半经验模型：

$$g_s=m\frac{A_n}{C_s}h_sp+b$$

式中，g_s =水蒸气的气孔导度(mol·m^{-2}·s^{-1}或m·s^{-1})；A_n =净同化作用率；m=来自观测的系数；b=来自观测的系数；h_s - 叶表面的相对湿度；C_s = 叶表面的 CO_2 浓度(Pa)；p=大气压(Pa)。

草原和松林的碳平衡模型

Esser G：在草原和松林中，气候改变对生产和分解的影响：Ecological Applications, 1992, 2(1)

(1) 净第一性生产力函数 (NPP)

$$NPP(j,m)=\min[NPP_T(j,m),NPP_P(j,m)]\cdot F(m)\frac{AV(j,m)}{AG(m)}F_{CO_2}(j,m)$$

式中，

$$NPP_T(j,m)=\frac{3000}{1+\exp[1.315-0.119T(j,m)]};$$

$$NPP_P(j,m)=3000\{1-\exp[-0.000664\,Pp(j,m)]\};$$

$$F(m)=\frac{\sum_{o=1}^{O(m)}f(o)\cdot AS(m,o)}{\sum_{o=1}^{O(m)}AS(m,o)};$$

$$F_{CO_2}(j,m)=A[1-\exp(-R(CO_2(j)-80))];$$

$$A=1+\frac{F(m)}{4};\quad R=-\ln\frac{A-1}{A}\cdot\frac{1}{240}。$$

(2) 植物量：

$$P(j,m)=5.9181\times10^{-4}A(m)^{0.79216}\cdot NPP(j,m)$$

(3) 枝叶损耗：

$$L_D = \sum_i - k_i L_i(t)$$

式中，i 是被分解的物质（木本、草本）；j 是典型年份；m 是栅格元素；o 是土壤单元，$o = 1, \cdots, O(m)$；A_G 是一个栅格单元 m 的总面积；A 是一个植被单元的平均站立年龄；A_V 是在栅格单元中被天然植被覆盖的面积；CO_2 是大气中的二氧化碳浓度；f 是土壤类型 $O(m)$ 的土壤因子；F 是一个栅格单元中所有 f 值的加权平均数；F_{CO_2} 是 NPP 中二氧化碳的肥沃因子；k_i 木本或草本植物的腐烂系数；L 枯枝败叶的堆积层；L_D 是枯枝败叶的损耗；P 是地上地下植物量的总量；Pp 是每年的平均降雨量；T 是每年的平均温度。

温度–湿度指数

Loza H J, Grant W E, Stuth J W et al：大型食草动物的基于生理特征的景观应用模型．Ecological Modelling, 1992, 61

温度-湿度指数通过它们对动物热应力的联合影响，把大气温度(T_a)和相对湿度(R_H)联系起来：

$$I_{th} = T_a - (0.55 - 0.55R_H)(T_a - 58.0)$$

油松林的能量平衡模型

肖文发：油松林的能量平衡．生态学报,1992，12(1)

(1) 油松林净辐射方程及其计算：

1) 油松林作用层的净辐射方程：

$$R_0 = Q_0(1-\alpha_0) - \varepsilon_0$$

式中，Q_0 为林冠上的总辐射；α_0，ε_0 分别为油松林的反射率和有效辐射。

2) 林地作用层的净辐射方程：

$$R_s = Q'(1-\alpha_s) - \varepsilon_s$$

式中，Q' 为到达林地的总辐射；α_s，ε_s 分别为林地反射率和有效辐射。

(2) 油松林能量平衡方程及其计算：

油松林的能量平衡方程：

$$R_0 = LE_0 + V_0 + M_0$$

式中，$LE_0 = \dfrac{R_0 - M_0}{1 + 0.64 \cdot \dfrac{\Delta T}{\Delta e} \cdot \dfrac{p}{p_0}}$；$V_0 = \dfrac{R_0 - M_0}{1 + 1.56 \cdot \dfrac{\Delta e}{\Delta T} \cdot \dfrac{p_0}{p}}$；$M_0 =$

$$\frac{1}{H - H_0}\left\{\int_{H_0}^{H} C_m(z)\cdot\left[T(z,t_2) - T(z,t_1)\right](H - z)\mathrm{d}z - \int_{1}^{H_0} C_m(z)\left[T(z,t_2) - T(z,t_1)\right](H - H_0)\mathrm{d}z - K\int_{t_1}^{t_2}\left[C_m(H)T(H,t) - C_m(H_0)T(H_0,t)\right]T(H_0,t)\mathrm{d}t + aK\int_{t_1}^{t_2}\int_{H_0}^{H} T(z,t)\mathrm{d}z\mathrm{d}t\right\}$$；

LE_0 为油松林的潜热通量；V_0 为显热通量；M_0 为油松林地土壤热交换；ΔT，Δe 分别为林冠作用层上 0.5~2.0m 气温差和水汽压差；p 为测点气压；p_0 为标准大气压；$C_m(z)$ 为土壤容积热容量；a 为土壤导温率。

铜与腐殖酸对小球藻生长影响的关系模型

王静，陈出新，陶澍：铜与腐殖酸对小球藻生长影响的研究．生态学报，1992，12(3)

(1) 铜对藻类生长的影响：

1) 致死率与铜浓度的关系模型：

$$M = B_1 e^{-B_2(C_f + B_3)^2}$$

式中，M 为致死率；C_f 为游离铜浓度；B_1、B_2 和 B_3 为常数。

2) 小球藻生长率与铜浓度的关系模型：

$$G = 1 - \int M = 1 - \int B_1 e^{-B_2(C_f + B_3)^2}$$

(2) 富里酸对小球藻生长的影响：

小球藻生长率与富里酸浓度的关系模型：

$$G = A_1 - A_2 e^{-A_3 F_A}$$

式中，G 为生长率；F_A 为富里酸浓度；A_1、A_2 和 A_3 为常数。

(3) 富里酸和铜对小球藻生长影响的定量模型：

小球藻生长率模型：

$$G = \left[1 - \int B_1 e^{-B_2(C_f + B_3)^2}\right](A_1 - A_2 e^{-A_3 F_A})$$

浮游植物碳同化速率模型

王宪，李文权：闽南-台湾浅滩近岸上升流区浮游植物碳同化速率的研究．生态学报,1992，12(3)

$$\mu = \frac{1}{t}\ln\frac{C_0 + C_t}{C_0}$$

$$K = \frac{1}{t}\log_2\frac{C_0 + C_t}{C_0}$$

式中，μ 和 K 分别为在一昼夜时间内和在复制时间内浮游植物碳同化速率常数；C_0 为实验前浮游植物细胞含碳量；C_t 为在一昼夜时间内浮游植物细胞同化碳的含量

南方鲇的最大摄食率模型

谢小军，孙儒泳：南方鲇的最大摄食率及其与体重和温度的关系 生态学报,1992，12(3)

(1) 最大摄食率模型：

$$R_{max} = (4251 - 617.0T + 29.87T^2 - 0.4402T^3)W^{-0.1107}$$

(2) 最大耗饵量模型：

$$C_{max} = (4251 - 617.0T + 29.87T^2 - 0.4402T^3)W^{0.8893}$$

式中，T 为温度；W 为体重。

水分利用效率模型

怀海富、黄子琛、董学军：毛乌素沙地油蒿和牛心朴子生理生态学研究 植物生态学与地植物学学报,1992，16(3)

$$\text{水分利用效率}(WUE) = \frac{\text{光合作用强度}(P)}{\text{蒸腾作用强度}(T)}$$

n 个样点的生态梯度轴 E_{GAPC_r}

顾万春、王维胜、李斌等：生态梯度轴(EGA)用于林木生态遗传的研究 PCA 方法估算 E_{GAPC_r} 生态学报,1992，12(4)

$$E_{GAPC_r} = \sum_{j=1}^{n} U_{ij} Z(j)$$

式中,U 为正文矩阵;i=1, 2, …n; 1≤r≤p; $Z(j)$为对应 U 变量的主要成分"权值"。利用主成分正交及欧式空间(R^n)的商高定理，此方程的误差为：$d_{(i)} = \sum_{j=r+1}^{p} \lambda_j$。

尖头塘鳢体长和体重的生长模型

叶富良，张健东：尖头塘鳢的年龄、生长和生活史类型的研究. 生态学报,1993，13(1)

$$L_t = 298.6[1 - e^{-0.2313(t-0.3028)}]$$

$$W_t = 577.4[1 - e^{-0.2313(t+0.3028)}]^3$$

式中，L_t 为 t 时刻尖头塘鳢的体长；W_t 为 t 时刻尖头塘鳢的体重。

综合生态效应 E 模型

王根轩，赵松岭：半干旱生态条件下植物个体的综合生态效应的空间距离分布规律. 生态学报,1993，13(1)

$$E = \alpha_1 E_{lo}\left[1+\left(\frac{x}{h_c}\right)^2\right]^{-\frac{3}{2}} + (\alpha_N E_{No} +$$

$$\alpha_W E_{Wo})\left[1+\left(\frac{x}{h_r}\right)^2\right]^{-\frac{3}{2}} +$$

$$(\alpha_c E_{co} + \alpha_h E_{ho})\left[1+\left(\frac{x}{h_c}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}}$$

式中，α_1，α_N，α_W，α_c 和 α_h 分别为光照、氮素、土壤水分、CO_2 浓度、相对湿度的生态效应系数；E_{lo} 为在植物立地点处的相对遮光度；h_c 为植物冠幅分布中心的高度；E_{No} 为植物分布中心处的氮素相对变化值；E_{Wo} 为根系分布中心处的相对变化值；$\frac{x}{h_r}$ 为根系相对立地距离；$\frac{x}{h_c}$ 为冠幅相对立地距离；E_{co} 为冠层几何中心的最大相对距离；E_{ho} 为冠层几何中心处的最大相对变化量。

叶日积 L_{ad} 模型

董振国，鲁全国：鲁西北平原高产夏玉米生育模式. 生态学杂志, 1993，12(2)

$$L_{ad} = \sum_{n=i}^{N} (I_{la} D)_n$$

式中，I_{la} 为叶面积指数；D 为时间。

山地主要造林树种的生理生态学特性模型

张祝平，何道泉：粤北石灰岩山地主要造林树种的生理生态学特性 植物生态学与地植物学学报，1993，17(2)

(1) 各树种光合有效辐射的利用效率 ε_F 模型：

$$\varepsilon_F = \frac{F_n \times 9.4 \times 100}{P_{ar} \times 217.4}$$

(2) 蒸腾系数 T_C 模型：

$$T_C = \frac{E_S}{F_n \times 0.67}$$

式中，F_n 为净光合速率；E_S 为蒸腾速率；P_{ar} 为光合有效辐射通量 F_n 的单位为 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$；$P_{ar}$ 的单位为 $mol \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$；$E_s$ 的单位为 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$。

水体某深度的太阳辐射强度 I_Z^λ 模型

祝宏达：主养鲢鳙非鲫高产鱼塘的初级生产力与能量转化效率的研究．生态学报，1993，13(3)

$$I_Z^\lambda = I_0^\lambda \cdot \mathrm{e}^{-\varepsilon Z}$$

式中，I_0^λ 为水表处的太阳辐射强度；e 为自然对数的底；Z 为水体中离水面的深度；ε 为水体中垂直消光系数

温度与麦长管蚜的关系模型

汪世泽，赵彬广：温度对麦长管蚜的影响．生态学杂志，1993，12(3)

(1) 发育速率 $V_{(t)}$ 与温度 T 关系模型：

$$V_{(t)} = \frac{KAB}{1+\exp[-r(T-T_0)]}$$

$$A = 1-\exp\left(-\frac{T-TL}{\delta L}\right)$$

$$B = 1-\exp\left(-\frac{TH-T}{\delta H}\right)$$

式中，K 为高温下的潜在发育速度；T_0 为最适发育温度；TL 为最低临界发育温度；TH 为最高临界发育温度；r 为随温度而变化的发育速度的增长率；δL 为低温区边界层宽度，反映对低温的忍耐程度；δH 为高温区边界层宽度，反映对高温的忍耐程度。

(2) 存活率 $P_{(x)}$ 与温度 X 的关系模型：

$$P_{(x)} = \exp\left[-\left(\frac{X}{b}\right)^c\right]$$

式中，$b>0$ 为尺度参数；$c>0$ 为形状参数；$x>0$ 为年龄时间值。

(3) 总生殖数 $F(x)$ 模型：

$$F(x) = A\int_0^x \exp\left[-\left(\frac{x-m}{D}\right)^2\right]\mathrm{d}x$$

式中，$x \geqslant 0$ 表示成虫期年龄(日)；$m \geqslant 0$ 表示生殖高峰的年龄位置；$D>0$ 表示生殖量变动最迅速的位置参数；$A>0$ 表示潜在的最大产仔量。

个体长蜥蜴之间的相似系数模型

徐海根，杨凤娟，宋志明：荒漠沙蜥的年龄划分．生态学杂志，1993，12(4)

$$r_{ij} = \frac{\frac{1}{\sigma_1}e^{-|x_{1i}-x_{1j}|}+\frac{1}{\sigma_2}e^{-|x_{2i}-x_{2j}|}+\frac{1}{\sigma_3}e^{-|x_{3i}-x_{3j}|}+\frac{1}{\sigma_4}e^{-|x_{4i}-x_{4j}|}}{\frac{1}{\sigma_1}+\frac{1}{\sigma_2}+\frac{1}{\sigma_3}+\frac{1}{\sigma_4}}$$

式中，r_{ij} 表示$(i+29)$体长的蜥蜴与$(j+29)$体长的蜥蜴之间的相似系数，$0 \leqslant r_{ij} \leqslant 1$，$i, j = 1,2,\cdots,52$，$r_{ij}$ 越大，则两体长的蜥蜴关系越紧密；$x_{1i(j)}$、$x_{2i(j)}$、$x_{3i(j)}$ 和 $x_{4i(j)}$ 分别为表示$(i+29)$和$(j+29)$体长蜥蜴的头宽、头长、尾长、体重的平均值；σ_1、σ_2、σ_3 和 σ_4 分别为体长与头宽、头长、尾长、体重的一元线性回归的均方根误差。

繁殖指数 I 模型

董维惠，侯希贤，林小泉等：黑线仓鼠种群数量动态预测研究．生态学报，1993，13(4)

$$I = \frac{NE}{P} = a + bt + ct^2$$

式中，N 为孕鼠数；E 为平均胎子数；P 为总捕获鼠数；a、b、c 为待定系数；t 为时间

温湿度对发育速率及内禀增长力影响的模型

施祖华，刘树生：温湿度对松毛虫赤眼蜂种群增长的影响．生态学报，1993，13(4)

(1) 温度对发育速率的影响：

平均发育速率(v)模型：

$$V = \frac{18.61012}{1+\exp(4.22394-0.17971t)}$$

(2) 温湿度对内禀增长力的影响：

内禀增长力 r_m 模型：

$$r_m = \frac{0.5172\left[1-\exp\left(-\frac{t-7.7769}{0.2683}\right)\right]\left[1-\exp\left(-\frac{30.8120-t}{0.2683}\right)\right]}{1+\exp[-0.2536(t-20.15)]}$$

式中，t 为温度

天然林中顶枯现象的模拟模型

Jeltsch F, Wissel C：模拟天然林中的顶枯现象．Ecological Modelling, 1994,75/76

(1) 将树木生境的发展分成三个不同的阶段：

阶段 1：当 $0 \leqslant t_p < T_1$，树木是年轻并且高活力的，因此最终压力不能导致生理年龄的增加，由此可得在

一段时期 $t \to t+1$ 时，增加量为 $t_p \to t_p+1$。

阶段 2：当 $T_1 \leqslant t_p < T_2$，树木变得容易受环境压力的影响，因此一定时期中，触发因子可能会导致生理年龄的增加：$t \to t+1$，$t_p \to t_p+k$，其中 $k>1$。

阶段 3：当 $T_2 \leqslant t_p < T_3$，树木如此脆弱，以至于它们不仅容易受环境压力的影响，而且容易受生物原因或其他加速因子的影响。这就导致死亡概率(t_p)的增加

(2) 将 $P_t(t_p)$ 定义为在生理年龄 t_p 和时间 t 的树木生境的百分比：

$$P_{t+1}(t_p+1)=P_t(t_p)$$

$$(t_p=1,\cdots,T_1)$$

$$P_{t+1}(t_p+k)=P_t(t_p)$$

$$(t_p=T_1+1,\cdots,T_2)$$

$$P_{t+1}(t_p+k)=[1-\mu(t_p)]P_t(t_p)$$

$$(t_p=T_2+1,\cdots,T_3)$$

式中，k 是触发因子(环境压力)导致的生理年龄 t_p 的实际增长率；k 随着生理年龄而增加：$k=k_M(t_p-T_1)/(T_3-T_1)$，$t_p>T_1$，K_M 是最大增长率。

(3) 死亡概率 $\mu(t_p)$ 也随生理年龄而增加：

$$\mu(t_p)=(t_p-T_2)^q/(T_3-T_2)^q$$

式中，参数 q 描述了增加的方式。

媒介寄生虫的竞争模型

Schmitz O J, Nudds T D：鹿和驼鹿身上媒介寄生虫的竞争——在驼鹿上脑膜蠕虫的影响. Ecological Applications, 1994, 4(1)

二重微分方程描述了白尾鹿(D)、驼鹿(M)、成年寄生虫(P)、第一阶段幼虫(L_1)、传染性幼虫(L_2)和腹足动物(G)的群体数量增长率，如下：

$$\mathrm{d}D/\mathrm{d}t=D(a_d-b_d-\beta_dD-\alpha_{dm}\beta_dM)$$

$$\mathrm{d}M/\mathrm{d}t=M(a_m-b_m-\beta_mM-\alpha_{md}\beta_mD)$$

$$\begin{aligned}\mathrm{d}P/\mathrm{d}t=\ &\pi\eta G(D+M)(L_2^2(k+1)/G^2k+L_2/G)-\\&[\mu_p+b_d+b_m+\delta_m\rho+D(\beta_d+\alpha_{md}\beta_m)+M(\beta_m+\\&\alpha_{dm}\beta_d)]P-\delta_m\rho M[P^2(k'+1)/M^2k'+P/M]\end{aligned}$$

$$\mathrm{d}L_1/\mathrm{d}t=\lambda P-\mu_1L_1-\Lambda L_1G$$

$$\begin{aligned}\mathrm{d}L_2/\mathrm{d}t=\ &\Lambda L_1G-(\mu_2+b_g)L_2-\pi\eta G(D+M)\times\\&(L_2^2(k+1)/G^2k+L_2/G)\end{aligned}$$

$$\mathrm{d}G/\mathrm{d}t=(a_g-b_g)G-\eta(D+M)(G+\pi L_2)$$

式中，D 是白尾鹿的数量；M 是驼鹿的数量；P 是成年寄生虫的数量；a 是中间或最后宿主的即时出生率；b 是中间或最后宿主的即时死亡率；β 是与宿主群体数量密度相关的死亡率；α 是最终宿主和其他宿主物种间竞争的影响；δ 是由于寄生虫的致病性导致的最终宿主的即时死亡率；L_1 是第一阶段幼虫的群体数量密度；λ 是被传播到中间宿主的第一阶段幼虫的即时出生率；μ_1 是第一阶段幼虫的即时死亡率；Λ 是第一阶段幼虫到中间宿主的传播率；G 是中间宿主的数量；η 是在最终宿主周围的中间宿主的即时摄入率；π 是由于寄生虫的存在，最终宿主周围中间宿主捕食率的增加值；L_2 是感染最终宿主的幼虫的群体数量密度；μ_2 是传染性幼虫的即时死亡率；k,k' 是负二项式分布的参数，分别用来量度中间宿主上传染性幼虫 (L_2)和最终宿主上成年寄生虫的聚合度。

原始生物大分子动态模型

张尚宏：逻辑斯缔方程在研究原始生物大分子动态及生命起源问题中的应用. 生态学报，1994，14(1)

(1) 一种原始生物大分子的增长模型：

$$\frac{\mathrm{d}N_m}{\mathrm{d}t}=r_mN_m\frac{K_m-N_m}{K_m}$$

(2) 当两种原始生物大分子同时存在并复制扩增时，竞争增长模型：

大分子 1：

$$\frac{\mathrm{d}N_{m1}}{\mathrm{d}t}=r_{m1}N_{m1}\frac{K_{m1}-N_{m1}-\beta_{12}N_{m2}}{K_{m1}}$$

大分子 2：

$$\frac{\mathrm{d}N_{m2}}{\mathrm{d}t}=r_{m2}N_{m2}\frac{K_{m2}-N_{m2}-\beta_{21}N_{m1}}{K_{m2}}$$

式中，$\frac{\mathrm{d}N_m}{\mathrm{d}t}$ 为原始生物大分子拷贝数的瞬时增长率；N_m 为原始环境中某一时刻生物大分子的拷贝数；r_m 为原始生物大分子本身的复制能力(速率)；K_m 为有原始环境的资源所决定的大分子拷贝数的极限值；下角 1 或 2 分别为大分子 1 或大分子 2；β_{12}，β_{21} 为不同种生物大分子之间的竞争系数，β_{12} 为每一个生物大分子 2 对大分子 1 复制的抑制作用，β_{21} 为每一个生物大分子 1 对大分子 2 复制的抑制作用。

径流土壤-植物-大气的通量模型

董学军，杨宝珍，郭柯等：几种沙生植物水分生理生态特征的研究. 植物生态学与地植物学学报，1994，18(1)

植物体内水流为稳流时，径流土壤-植物-大气的通量模型可表达为：

$$q=\frac{\psi_S-\psi_r}{r_1}=\frac{\psi_r-\psi_1}{r_2+r_3+r_4}-\frac{\psi_1-\psi_a}{r_5+r_6+r_7}$$

式中，r_1为土壤阻力；r_2为根木质部阻力；r_3为茎木质部阻力；r_4为气孔阻力；r_5为角质层阻力；r_6为边界层阻力；r_7为外界空气阻力；$\psi_S-\psi_r$为根系与土壤之间的水势梯度；$\psi_r-\psi_1$为叶片与根系之间的水势梯度；$\psi_1-\psi_a$为大气与叶片之间的水势梯度。

Li-Strahler几何光学林冠模型

Wu Y, Strahler A H：遥程估算俄勒冈州横断面上的树冠大小、林分密度和生物量. Ecological Applications, 1994, 4(2)

(1) 像素的反射系数：

$$S=K_gG+(1-K_g)(K_cC+K_zZ+K_tT)$$

式中，C，T，G和Z分别是有光照的树冠、被遮蔽的树冠、有光照的背景和被遮蔽的背景的反射系数；$K_c=\frac{\pi(1+\cos\Theta')}{2\Gamma}$，$K_t$和$K_z=e^{-m\pi}[1-(\pi/\Gamma)]$分别是有光照的树冠、被遮蔽的树冠和被遮蔽的背景的比例；$K_g=e^{-m\Gamma}$，$m=NR^2$，R^2是群落中所有像素的r_1^2的平均值。

下面是有光照的树冠、被遮蔽的树冠和被遮蔽的背景的面积公式，应用了三维球面投影几何学：

$$A_c=\frac{\pi}{2}r_1^2(1+\cos\Theta')$$

$$A_t=\frac{\pi}{2}r_1^2(1-\cos\Theta')$$

$$A_z=r_1^2(\Gamma-\pi)$$

式中，r_1是椭球体的横轴半径；Γ是每单位r_1所产生的树冠和阴影的面积；π是一单位林冠的面积；$\Theta'=\arctan\left(\frac{r_v}{r_1}\tan\Theta\right)$；$r_v$是椭球体的纵轴半径；$\Theta$是太阳的天顶角。

(2) 考虑了地形的影响之后的阴影背景的面积(A'_z)：

$$A'_z=\frac{A_z\cos\alpha\cos\Theta}{\cos(\Theta-\beta_v)}$$

式中，α是倾角；$\beta_v=\arctan(\tan\alpha\cos\phi)$；$\phi$是相对方位。$\Gamma$被修正为：$\Gamma'=\pi+(\Gamma-\pi)\frac{\cos\alpha\cos\Theta}{\cos(\Theta-\beta_v)}$

(3) 生物量异速生长方程的通式为：

$$\ln B(x)=k\ln x+b$$

式中，x是树的胸径；k和b是常数

(4) 胸径的分布函数$P(x)$为：

$$P(x)=\begin{cases}\frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma x}\exp\left\{\frac{-(\ln x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} & (x>0)\\ 0 & (x<0)\end{cases}$$

式中，μ和σ^2分别是$\ln x$的均值和方差。

(5) 每棵树的平均生物量$E(B)$如下：

$$E(B)=\exp\left[b+\frac{1}{2}(\sigma^2k^2+2\mu k)\right]$$

菹草对营养盐的吸收速率(v)

金送笛，李永函，倪彩虹等：菹草(*Potamogeton crispus*)对水中氮、磷的吸收及若干影响因素. 生态学报，1994，14(2)

$$v=\frac{(C_0-C_t)V}{mt}$$

式中，C_0为曝光后空白对照瓶中营养盐的浓度；C_t为曝光后试验瓶中营养盐的浓度；V为试验瓶中水体积；t为曝光持续时间；m为菹草重。

MCHOG模型

Shao G, Shugart H H, Young D R：模拟Viginia堰洲岛灌木丛(*Myrica cerifera*)的蒸腾作用对环境变化的灵敏度. Ecological Modelling, 1995, 78

MCHOG模型由三个子模型组成：蒸腾作用、根部水分平衡和地下水位动力学模型。

(1) 蒸腾作用子模型：

$$W_{LH}T_{RG}=\frac{S_{VT}(S_{RN}-S_{HF})+D_{TA}S_{HA}(S_{VP}-W_{VP})/R_{AE}}{S_{VT}+P_{SC}(1+R_{ST}/R_{AE})}$$

式中，W_{LH}是水的潜热(cal·g^{-1})；T_{RG}是蒸腾作用率(g·m^{-2}·h^{-1})；S_{VT}是饱和水汽压曲线的斜率(mbar·℃$^{-1}$)；S_{RN}是太阳辐射(cal·m^{-2}·h^{-1})；S_{HF}是土壤热量的流量密度(cal·m^{-2}·h^{-1})；D_{TA}是大气密度

$(\mathrm{g\cdot m^{-3}})$；S_{HA}是大气的比热$(\mathrm{cal\cdot g^{-1}\cdot ℃^{-1}})$；$S_{VP}$是饱和水汽压(mbar)；$W_{VP}$是水蒸气的水汽压 (mbar)；$P_{SC}$是干湿计常数$(\mathrm{mbar\cdot ℃^{-1}})$；$R_{AE}$是树冠的空气动力学阻力$(\mathrm{s\cdot m^{-1}})$；$k_{ST}$是树冠的气孔阻力$(\mathrm{s\cdot m^{-1}})$。

(2) 根部土壤水分平衡子模型：

$$C_{SWC}=(P_{CT}+W_{CR}-I_{TC}-D_{DD}-E_{VP}-T_{RM})/R_{ZD}$$

式中，C_{SWC}是土壤水含量的变化$(\mathrm{m^3\cdot m^{-3}\cdot h^{-1}})$；$P_{CT}$是降水量$(\mathrm{mm\cdot h^{-1}})$；$W_{CR}$是从地下水位的水分毛细上升$(\mathrm{mm\cdot h^{-1}})$；$I_{TC}$是树冠截留$(\mathrm{mm\cdot h^{-1}})$；$D_{DD}$是向下排入深层土壤的水分$(\mathrm{mm\cdot h^{-1}}$$E_{VP}$从土壤表面的直接蒸发$(\mathrm{mm\cdot h^{-1}})$；$T_{RM}$是植物的蒸腾作用速率$(\mathrm{mm\cdot h^{-1}})$；$R_{ZD}$是根部深度 (mm)。

(3) 地下水模型：

由 Darcy 自由含水层定律推出的一维地下水位方程：

$$\frac{K}{2}\left(\frac{\mathrm{d}^2h^2}{\mathrm{d}x^2}\right)=S\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t}-R(x,t)$$

式中，K是水压传导率$(\mathrm{cm\cdot h^{-1}})$；$h$是蓄水高度(cm)；$S$是地下水蕴藏系数$(\mathrm{cm^3\cdot cm^{-3}})$；$R(x,t)$是在位置$x$和时间$t$的地下水再填充率。

森林 CO_2 需求模型

Kokorin A O, Nazarov I M：升温对俄罗斯北部森林的生长参数分析及其在碳预算模型中的应用。Ecological Modelling, 1995, 82

每一地块的碳动力学(i,经济区的数量；j，森林区域的数量）为：

$$\mathrm{d}_{WR_{ij}}(t)/\mathrm{d}t=W_{R_{ij}}(t)\cdot[1+I_{GR_j}\cdot\mathrm{d}T(t)+b_j\cdot\mathrm{d}P(t)+c_j\mathrm{d}C(t)](\mathrm{V}g_j-\mathrm{V}d_j)$$

$$\mathrm{d}_{L1_{ij}}(t)/\mathrm{d}t=W_{R_{ij}}(t)Vd_j+G_{B_{ij}}(t)Vd_j-L_{1_{ij}}(t)V_{1_j}[1+q_i dT(t)]$$

$$\mathrm{d}H_{L_{ij}}(t)/\mathrm{d}t=(L_{1_{ij}}(t)\cdot V_{1_j}\cdot K_g\cdot K_1-H_{L_{ij}}(t)\cdot V_{h_j})[1+q_i\cdot\mathrm{d}T(t)]$$

$$G_{B_{ij}}(t)=G_{B_{ij}}(0)W_{R_{ij}}(t)W_{R_{ij}}(0)^{-1}$$

式中，$W_{R_{ij}}$和$G_{B_{ij}}$指木材和绿色生物量中碳浓度$(\mathrm{Mg\ Chm^{-2}})$；$L_{1_{ij}}$和$H_{L_{ij}}$是干草和不稳定腐殖质中的碳；$\mathrm{d}T$、$\mathrm{d}C$是温度的变化、降水量和CO_2浓度；Vg_j, Vh_j, Vl_j, 和Vh_j指生长率或分解率；Vd_j是树木死亡率；Kg和Kl是决定总腐殖质构成中干草腐殖质部分和不稳定腐殖质部分的系数。

浮游动物对浮游细菌的牧食力模型

李艳厚，林婉莲：武汉东湖浮游动物对浮游细菌的牧食力研究．生态学报，1995，15(2)

(1) 浮游细菌的数量N模型：

$$N=\frac{b\cdot e}{a\cdot c\cdot d}$$

式中，a为水样用量；b为滤膜有效面积；c为每视野计数面积；d为每样品计数视野数；e为所有视野计数得的细菌总数。

(2) 浮游动物对浮游细菌的滤过率C模型：

$$C=\frac{\ln(C_1-C_t)\cdot v}{N\cdot t}$$

(3) 摄食率F模型：

$$F=A\cdot C\cdot C_0$$

(4) 特定摄食率模型：

$$F_s=F/B$$

式中，C_1，C_t分别为t时对照组和实验样品中浮游细菌密度；C_0为实验开始时水样中浮游细菌现存量；v为实验水样体积；N为单位水体计的浮游动物量；t为实验时间；A为转换系数；B为实验瓶中浮游动物生物量。

在多维生态因子影响下的 IRM 综合速率模型

张崇邦，杨持春，曾数锦等：东北羊草草原综合生态因子对微生物生长的作用——IRM 模型的研究．生态学报，1995，15(2)

$$M_{t+\Delta t}=M_t\left[1+(R_{prg}\cdot r_n-R_{DR})\Delta t\right]$$

式中，M_t为初始生物生长量；$M_{t+\Delta t}$为t时刻的生物生长量；R_{prg}为生物内禀生长速率；$r_n=\sum_{i=1}^{n}W_i\Big/\sum_{i=1}^{n}\frac{W_i}{\eta_i x_i}$，$r_n\in[0,1]$，为综合作用指数。

栎呼吸量的测定模型

方精云，王效科，刘国华等：北京地区辽东栎呼吸量的测定．生态学报，1995，15(3)

(1) 呼吸速率r模型：

$$r=\frac{7.07}{t}\frac{1}{W}(c_2-c_1)(V_c-V_s)\Big/\left(\frac{273+T}{273}\right)$$

式中，t为量测定的间隔时间；W为试验鲜重；c_1,c_2

分别为第1次和第2次测定的CO_2浓度；V_c、V_s分别为容器和试样的体积；T为测定时容器内的温度。

（2）呼吸量R模型：

$$R=\int_{x_1}^{x_2} r(x)\mathrm{d}w(x)$$

式中，r为平均呼吸速率；w为器官的总重量。

土壤微生物生物量养分的计算公式

傅声雷，叔伟民，丁明懋：鼎湖山不同植被类型下土壤微生物养分的矿化　植物生态学与地植物学学报，1995，19(3)

$$生物量氮或钾=\frac{矿化氮或矿化钾}{氮或钾的矿化率}$$

$$生物量磷=\frac{矿化磷}{磷的矿化率\times磷的恢复率}$$

混合物分解和几何反射率模型

Hall F G, Shimabukuro Y E, Huemmrich K F：使用混合物分解和几何反射率模型对森林生物物理结构的遥感，Ecological Applications，1995，5(4)

对于更多元素放射成分反射率的线性结合，被圆柱体(S)遮挡的背景部分可表达为：

$$S=1-C-(1-C)^{\eta+1}$$

$$\eta-R\tan\theta$$

式中，C是阳光照射的树冠部分；R是圆柱体的高宽比；θ是太阳天顶角。

假设生物量密度与C成比例，一个新的变量——生物量密度部分B_{mdf}，是指太阳照射树冠部分C的生物量密度B_{md}与整个树冠部分的生物量密度的比率，可表示为：

$$B_{mdf}=B_{md}/B_{mdmax}$$

式中，$B_{md}=B_{mdmax}$，当$C=1$时，有：

$$S=1-B_{mdf}-(1-B_{mdf})^{\eta+1}$$

$$B=(1-B_{mdf})^{\eta+1}$$

树叶量损失测定模型

Findlay S, Carreiro M, KrischikV, et al：活体植物的伤害对树叶枯萎状况的影响　Ecological Applications，1996，6(1)

$$M_t=R+(M_t-R)e^{-kt}$$

式中，M_t是时间t的树叶量；R是不能腐烂的树叶残留部分的数量；k是腐烂率。

土壤水分蒸发蒸腾损失总量的测定模型

Walker B H, Langridge J L：利用有限的生境数据，模拟半干旱生态系统中植物和土壤水动力学　Ecological Modelling，1996，87

（1）绿色植物的蒸腾：

$$\eta_{TANS}=\left[\frac{\varepsilon R(1-L_p)+\rho\lambda D/r_a}{\varepsilon+1+r_c/r_a}\right]/\lambda$$

式中，η_{TANS}是蒸腾率$(kg\cdot m^{-2}\cdot s^{-1})$；$R$是表面可获得能量的流量它组成了净辐照度，单位是$W\cdot m^{-2}$；$L_p$是$R$到达地面的比例；$\varepsilon$是特定饱和度下湿度的斜率，$\rho$是大气密度$(kg\cdot m^{-3})$；$D$是大气层的水汽压差额$(kg\cdot kg^{-1})$；$r_a$是大气阻力$(s\cdot m^{-1})$；$r_c$是树冠阻力$(s\cdot m^{-1})$。

（2）土壤的蒸发：

$$\eta_{EVAP}=\left(\frac{\varepsilon RL_p+\rho\lambda D/r_a}{\varepsilon+1+r_s/r_a}\right)/\lambda$$

式中，η_{EVAP}是蒸发率；r_s是表面张力$(s\cdot m^{-1})$；$r_a=\frac{\ln[(z-d)/z_0]^2}{k^2\overline{u}}$，$\overline{u}$是高度$z$处的平均风速$(m\cdot s^{-1})$，$z$是在气象数据测量表面之上的高度(m)，$z_0$是要素交换处形阻力的长度特性，$d$是从一个任选起始高度0，到热、水蒸气或者要素交换的平均高度的距离为$r_c=\frac{r_{c(min)}}{f_D f_W f_T f_L}$，其中$r_{c(min)}$是最优状况下树冠阻力的最小值，$f_D$、$f_W$、$f_T$和$f_L$是在0和1之间的无量纲的函数，它使$r_c$从它的最小值开始增加，$f_D$刻画了水汽压不足产生的压力，$f_W$刻画了土壤水不足产生的压力，$f_T$刻画了温度依赖性，$f_L$刻画绿叶的数量$r_s=\frac{r_{s(min)}}{f_{WT}f_{TC}}$，$r_{s(min)}$是最优状况下土壤表面阻力的最小值，$f_{WT}$是顶层土质地、土壤水缺乏和水蒸气扩散阻力的函数，$f_{TC}$是活和死覆盖物的函数，随着土壤上覆盖物总量的增加，土壤表面阻力也会增加。

藻类生长模型

刘鸿雁，徐云麟：镜泊湖藻类生长和湖泊富营养化预测初探　生态学报，1996，16(2)

$$\mathrm{d}A/\mathrm{d}t=GA-LA$$

式中，A为藻类浓度；G为藻类生长率；L为藻类损失率。

任豆林的生物量和光能利用率测定模型

张纪平，付德泉，赵惠停：任豆林的生物量和光能利用率．植物生态学报，1996，20(6)

(1) 生物量的测定：

生长关系模型：

$$W = a\left(D^2 H\right)^b$$

式中，W 为植物相应部分的干重；D、H 分别为样木胸径和树高。

(2) 乔木光合速率的测定：

各层植物的光合速率 F_n 模型：

$$F_n = \frac{\mu_1 CO_2 \cdot V}{A \cdot 10^3} \times \frac{44}{22.4} \times \frac{273}{273 + T} \times \frac{P}{101322}$$

式中，F_n 为净光合速率；V 为闭式叶室和管道的气体容量；A 为叶面积；T 为叶室内的温度；P 为大气压。

树冠再生过程空间模型

Moravie M A, Pascal JP, Auger P：通过基于个体的空间模型研究树冠再生过程——适用于热带雨林．Ecological Modelling, 1997, 104

(1) 增长模型：

$$\text{预期增长} = \text{潜在增长} \times \text{竞争指数}$$

树干的胸径 $D_i(x, y, t)$ 的计算如下：

$$D_i(x,y,t) = \frac{1}{a_i}\ln\left(\frac{R_i(x,y,t)}{K_{\max_i} - R_i(x,y,t)} \cdot \frac{K_{\max_i} - R_i(0)}{R_i(0)}\right)$$

式中，$R_i(x,y,t) = \frac{1}{8}\sum_{j=1}^{8} R_{i,j}(x,y,t)$ 是在时间 t 平均的树冠半径；$R_i(0)$ 是当那些树在立地中出现时的树种 i 的树冠半径；$K_{\max_i}$ 是对于树种 i 的 $D_i(x,y,t)$ 的最大值；a_i 是参数。

(2) 竞争指数 CI：

$$CI_i = \left[\prod_{k=1}^{N_i}\left(\frac{H}{H_k}\right)^{1-d_k \cdot 10}\right]^{\mu}\left(\frac{BA}{\sum_{k=1}^{N_n} BA_k}\right)^{\gamma}$$

式中，CI_i 是处于位置 (x, y) 上的树种 i 的第 j 个方向上的竞争指数；BA 是树的基部面积；H 是树的高度；H_k 是相临树 k 的高度；d_k 是到相临树 k 的距离；N_n 是临近的树的总数；N_i 是比研究对象树更高的相邻树的数量；参数 μ 和 γ 是加权系数。

邻体干扰指数

洪伟，吴承祯，蓝斌：邻体干扰指数通用模型及其应用．植物生态学报，1997，21(2)

(1) 干扰指数 H 模型：

$$H = \sum_{i=1}^{N} S_i^{\alpha} S^{\beta} d_i^{\gamma}$$

(2) 干扰规律模型：

$$Z_S = a - bH$$

式中，S_i 为第 i 株邻体胸高断面积大小；S 为基株胸高断面积大小；d_i 为第 i 邻体到基株的距离；α, β, γ 为待定系数；Z_S 为近两年胸高断面积生长量；a 为回归常数；b 为回归系数。

土壤和蚯蚓体内重金属含量相关性测定模型

郭永灿，王振中：重金属对蚯蚓肠道上皮细胞超微结构损伤的研究．生态学报，1997，17(3)

秩相关系数 r_s 模型：

$$r_s = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i^2}{n^2 - n}$$

式中，n 为样本对数目；d_i 为秩差=单个样本−样本平均值。

柑橘潜叶蛾发育速率模型

王联德，尤民生，郑琼华等：柑橘潜叶蛾发育速率模型的研究．生态学报，1997，17(4)

(1) 线性日度模型：

$$V(T) = \frac{T}{K} - \frac{C}{K}$$

式中，T 为实验温度；$V(T)$ 为温度 T 下的发育速度；K 为有效积温；C 为发育起点温度。

(2) 王氏模型：

$$V(T) = \frac{K}{1 + \exp\left[-r(T - T_0)\right]} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{T - T_l}{\delta}\right)\right]\left[1 - \exp\left(-\frac{T_h - T}{\delta}\right)\right]$$

式中，K 为高温下潜在的饱和发育速率；T_l、T_h 分别为最低、最高临界发育温度；r 为发育速率随温度变化的指数增长率，即发育曲线的斜率；T_0 为最适发育温度；δ 为边界层的宽度，其大小反映了昆虫对极端温

度的不同忍耐程度。

(3) 生物物理模型：

$$V(T)=\frac{R_{ho25}\frac{T}{298.15}\exp\left[\frac{H_a}{R}\left(\frac{1}{298.15}-\frac{1}{T}\right)\right]}{1+\exp\left[\frac{H_l}{R}\left(\frac{1}{T_l}-\frac{1}{T}\right)\right]+\exp\left[\frac{H_h}{R}\left(\frac{1}{T_h}-\frac{1}{T}\right)\right]}$$

式中，R 为大气常数；R_{ho25} 为 25℃下的发育速率；H_a 为反应的活化焓；T_l 为反应速率控制酶呈半活化、半低温钝态时的温度；T_h 为反应速率控制酶呈半活化、半高温钝态时的温度；H_l 为与低温有关的焓的变化；H_h 为与酶高温有关的焓的变化。

森林个体空间动态模型

镶嵌(FORMOSAIC)－景观镶嵌中森林个体空间动态模型. Ecological Modelling, 1998, 106

(1) 增长子模型：

个体树 i 的相对增长率(r_{gr_i}) 如下：

$$\ln r_{gr_i}=\beta_0+\beta_1 \ln(d_{bh_i})^n+\beta_2 \ln n_{ij}+\beta_3 \ln s_{lp_i}+\beta_4 \ln e_{le_i}+\beta_5 \ln h_{ab_i}+\varepsilon_i$$

式中，d_{bh_i} 是树的胸径；n 是一个变化范围在 0.01 到 15 中间的系数，不同的物种有不同的值；n_{ij} (临近影响)是一个栅格单元中除了研究对象之外的所有树的总基部面积；s_{lp_i} 是斜率；e_{le_i} 是海拔高度；h_{ab_i} 是距离湿地的最短距离；ε_i 是误差估计

(2) 死亡子模型：

每年死亡率 (M_a)如下：

$$M_a=1-\left(\frac{N_{t_2}}{N_{t_1}}\right)^{t_2-t_1}$$

式中，N_{t_2} 和 N_{t_1} 分别是在时间 t_2 和 t_1 时群体大小，t_2-t_1 是两次群体普查之间的间隔。

繁殖模型

Hoffmann W A：新热带萨瓦那草原木本植物在火烧后的繁殖－性别和植物繁殖的相对重要性. The Journal of Applied Ecology, 1998, 35

树木的繁殖概率的回归方程为：

$$p=k\frac{e^{a+bd}}{1+e^{a+bd}}$$

式中，p 是繁殖概率；d 是树干直径；参数 k 准许回归线逐渐逼近某个小于 1 的值；a 和 b 是回归参数。

不同阈值下昆虫的二项式抽样设计模型

张光美，刘文演：不同阈值下昆虫的二项式抽样设计. 生态学杂志，1998，17(1)

(1) 二项式抽样的经验模型：

$$m=e^a(-\ln P_T)^b$$

式中，m 为昆虫的种群密度；P_T 为单位样本昆虫数量不超过数阈值 T 的样本单位比例；a 和 b 为回归参数。

(2) 抽样误差估计 $V_{ar}(m)$ 模型：

$$V_{ar}(m)=m^2\left\{\frac{b^2(1-P_T)}{nP_T\cdot\ln^2 P_T}+\frac{M_{SE}(N+1)}{N}+\left[\ln(-\ln P_T)-P_m\right]^2 S_b^2\right\}$$

式中，n 为样本数；N 为用来拟合方程的数据组数；M_{SE} 为 $\ln m$ 对 $\ln(-\ln P_T)$ 的回归均方误；P_m 为 $\ln(-\ln P_T)$ 的平均值；S_b^2 为回归系数 b 标准误差。

(3) 二项式抽样样本容量 n 模型：

$$n=\frac{\dfrac{b^2(1-P_T)}{P_T\ln^2 P_T}}{\dfrac{d}{Z_{\alpha/2}}-\left[\ln(-\ln P_T)-P_m\right]^2 S_b^2-\dfrac{M_{SE}(N+1)}{N}}$$

式中，$Z_{\alpha/2}$ 为标准正态离差，$P(Z>Z_{\alpha/2})=\frac{\alpha}{2}$；$d=\frac{CI}{2}(m)$ 为预定置信区间(CI 表示)的一般宽度。

红松林动态模拟模型

桑卫国，李景文：小兴安岭南坡红松林动态模拟. 生态学报，1998，18(1)

(1) 有效生理辐射 $I(z)$ 模型：

$$I(z)=I(0)e^{-KL(z)}$$

式中，$I(0)$为林冠层上部的有效生理辐射；$I(z)$ 为冠层深处 z 的有效生理辐射；K 为群落的消光系数；$L(z)$ 为模拟样地中所有林木高于 z 处的积累叶面积指数。

(2) 同化作用率 $P(z)$ 模型：

$$P(z)=\frac{KI(z)-c}{KI(z)+\alpha-c}$$

式中，$P(z)$ 为林冠层 z 处叶的同化作用率；$KI(z)$为该层平均有效生理辐射吸收率；c 为树种的光补偿点；α 为树种的光半饱和点

(3) 生长量模型：

$$\frac{d(D^2H)}{dt}=\left(1-\frac{W}{W_{max}}\right)\int_B^H S_L[\gamma P(z)-\delta z]dz$$

式中，D 为胸径；B 为枝下高；H 为树高；S_L 为树冠层叶面积线密度；γ,δ 为与树种有关的表示同化作用和呼吸作用的参数；W 为模拟样地的生物量；W_{max} 为该森林群落的最大生物量。

(4) 树高 H 模型：

$$H=1.3+(H_{max}-1.3)\left(1-\exp\frac{SD}{H_{max}-1.3}\right)$$

式中，H_{max} 为最大树高；S 为常数。

(5) 单木叶面积年变化方程：

$$\frac{dL}{dt}=2CD\frac{dD}{dt}-t_{SW}L$$

式中，L 为单木叶面积；C 为与树种有关的常数；t_{SW} 为边材向心材的年转化率。

(6) 死亡率模型：

$$M_0=1-(1-\varepsilon)^n$$

式中，M_0 为年龄 n 时树木死亡概率；ε 为树木年死亡率；n 为树木年龄。

昆虫发育速率与温度关系的复合数字模型

尤妙青，郭振中，熊继文：温度对深点食螨瓢虫实验种群的影响 生态学报，1998，18(2)

$$V(T)=\frac{K}{1+\exp[-r(T-T_0)]}\times\left[1-\exp\left(-\frac{T-T_L}{\delta}\right)\right]\left[1-\exp\left(-\frac{T_H-T}{\delta}\right)\right]$$

式中，K 为高温下潜在的饱和发育速率；r 为发育速率随温度变化的指数增长率；T_L，T_H 和 T_0 分别为最低、最高临界发育温度和最适发育温度；δ 为边界层的宽度。

呼吸作用预测模型

Burton A J, Pregitzer K S, Zogg G P et al：干旱对舒加枫木林呼吸作用的降低，Ecological Applications, 1998, 8(3)

(1) 对细根呼吸作用的预测模型：

$$R_{O_2}=(0.063N+0.670M)e^{0.098T}$$

式中，R_{O_2} 是指每秒每克氧气参与的呼吸作用；N 是指根中氮的浓度；M 是指土壤的基本潜能；T 是指地下 15cm 处的土壤温度。

(2) 土壤中根呼吸作用产生 CO_2 的预测模型：

$$R_{CO_2}=(0.058N+0.622M)e^{0.098T}$$

式中，R_{CO_2} 是指每秒每克 CO_2 参与的呼吸作用。

单木竞争指数

邹春静，徐文铎：沙地云杉种内、种间竞争的研究 植物生态学报，1998，22(3)

$$I_c=\sum_{j=1}^{N}(D_j/D_i)\cdot\frac{1}{L_{ij}}$$

式中，I_c 为竞争指数，I_c 越大表明竞争越激烈；D_i 为对象木 i 的胸径；D_j 为竞争木 j 的胸径；L_{ij} 为对象木 i 与竞争木 j 之间的距离；N 为竞争木的株数。

新昆虫个体生长率 G

苏建伟，盛承发：叶色草蛉幼虫个体生长率模型 生态学报，1998，18(4)

$$G=G_0\left[1-e^{-B(I-C)}\right]$$

式中，I 为食物摄入率；G_0,B,C 为参数。

气孔开放的均匀程度模型

张守仁，高荣孚：白杨派新无性系气孔生理生态特性的研究 生态学报，1998，18(4)

$$X=(\bar{x}_i/\bar{x}_{max})\cdot[\bar{x}_i/(\bar{x}_i+\sigma_i)]\times100\%$$

式中，$\bar{x}_{max}$ 为全天中气孔开放度的峰值；$\bar{x}_i$ 为全天中任一时间取样气孔开放度的平均值；σ_i 为全天中任一时间取样气孔开放度的标准差。

荠苎的光合特性及其对土壤水分的响应模型

常杰，刘珂，葛滢等：杭州石荠苎的光合特性及其对土壤水分的响应 植物生态学报，1999，23(1)

(1) 净光合速率 P_n 模型：

$$P_n=\frac{\Delta C}{1\,000\,000}\cdot\frac{60}{t}\cdot\frac{44}{22.4}\cdot\frac{273}{273+T}\cdot\frac{100}{l}\cdot V$$

式中，ΔC 为 CO_2 浓度差；t 为光合时间；T 为叶室内温度；l 为叶面积；V 为叶室体积。

(2) 蒸腾速率 Tr 模型：

$$Tr=\frac{W_1-W_2}{tl}$$

式中，W_1 和 W_2 分别为前后两个时刻植物地上部分的重量；其他同上。

(3) 土壤含水率模型：

$$土壤含水率 = \frac{W_f - W_d}{W_d} \times 100$$

式中，W_f、W_d 分别为土壤的鲜重和干重。

干旱指数

Fensham R J，Holman J E：澳大利亚萨瓦那草原中干旱引起的树木顶枯的时空模式. The Journal of Applied Ecology，1999，36

Foley 干旱指数($D_{m,y}$)：

$$D_{m,y} = \sum_{z=y-x+1}^{z=y} d_{m,z}$$

式中，$D_{m,y}$ 表示第 y 年第 m 月中的干旱指数；$d_{m,z}$ 是被生境平均每年降水量(A)标准化的降水赤字，可表达为 $d_{m,z} = \sum_{i=m-12+1}^{m} \frac{a_{m,y} - A}{A}$，$a_{m,y}$ 是第 y 年第 m 月中的降水量。

竞争指数

Pelt R V，Franklin J F：在过熟的道格拉斯冷杉林中，林下叶层中的树对用于实验的地沟的反应. Ecological Applications，1999，9(2)

竞争指数是一个依赖于距离的测量值，它可以模拟树根竞争的影响，其研究模型可表达为：

$$I_c = \sum \frac{V_{c_i}}{d_i^2}$$

式中，V_{c_i} 是参与竞争的树的树冠体积；d_i 是指受影响的树到每一竞争者之间的距离。

碳循环分析模型

Kurz W A，Apps Michael J：加拿大森林区七十年的碳循环回顾性分析. Ecological Applications，1999，9(2)

(1) 用于模拟 CBM-CFS2 中地面生物量动态过程的方程式：

Ⅰ.再生阶段：

$B_t = B_{init} + at$，n 年后过渡到第二阶段。

Ⅱ. 未成熟生长阶段：

$B_t = B_{t-1} + B_{t-1} r\left(1 - \frac{B_{t-1}}{B_{max}}\right)$，当 $B_t = qB_{max}$ 时，过渡到第三阶段

Ⅲ. 成熟生长阶段：

$B_t = B_{imm} + ct$，m 年后过渡到第四阶段。

Ⅴ. 过熟生长阶段：

未衰退(例如平均年龄的树仍然存在)：$B_t = B_{mat}$，没有过渡；衰退，$B_t = B_{mat}(1-d)^t$；当 $B_t = qB_{max}$ 时，过渡到第Ⅱ阶段

式中，t 是指在当前状态下的年数；B_{init} 是初始生物量密度；B_{imm} 是在未成熟生长阶段结束时的生物量，B_{mat} 是在成熟生长阶段结束时的生物量；n 是再生阶段持续的时间；m 是成熟生长阶段持续的时间；c 是成熟生长阶段的增长率；d 是指过成熟阶段生物量下降的速率；a、r、q 和 B_{max} 是通过匹配盘存数据而得到的参数。

(2) 死有机物的动态过程：

基本分解速率的一个依赖于温度的修正公式：

$$T_{Mod} = e^{(T_{mat} - T_{ref})\ln Q_{10} \times 0.1}$$

式中，T_{mat} 是空间单元 i 的年平均温度；Q_{10} 是参数；T_{ref} 是参考年平均温度。

分解率的第二修正式：用于解释在直立树冠条件下分解率的变化。

$$S_{Mod} = 1 + (max_{DecayMult} - 1)e^{b(T_{bio_s} / max_{bio_g})}$$

式中，T_{bio_s} 是指地面上总的生物量；max_{bio_g} 是与记录 s 相关的生长曲线 g 的最大地面生物量；$max_{DecayMult}$ 是指无树冠的条件下的衰减速率乘数。

(3) 死有机物分解的四个阶段中各阶段的分解速率为：

$$D_{ecay_j} = B_{decay_j} T_{mod} S_{mod}$$

呼吸作用对温度和营养的反应模型

Vose J M，Bolstad P V：对东部各种不同的落叶林的 NPP 模型的挑战：不同树种间树叶呼吸作用对温度和营养的反应比较. Ecological Modelling，1999，122

(1) 呼吸作用率：

呼吸作用率对温度的反应通过非线性回归方法可表达为：

$$R_{rate}(\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \text{ 或 } nmol \cdot g^{-1} \cdot s^{-1}) = \beta_0 e^{\beta l}$$

(2) 实际夜晚叶面呼吸率 R_d：

$$R_d = RQ_{10}^{(T_{night} - P_{snTOPT})/10} l_{night}$$

式中，R_d 是叶面呼吸率($nmol \cdot g^{-1}$)；T_{night} 是夜晚平均温度(℃)；P_{snTOPT} 是光合作用最佳温度(℃)；l_{night} 是夜晚时间长度(s)。

生态系统的净初级生产力的模拟模型

Jiang H, Peng C, Apps M J et al：应用GAP模型模拟中国温带木生态系统的净初级生产力 Ecological Modelling, 1999, 122

(1) 总树高 H：

$$H = h_1[1-\exp(h_2D)]h_3$$

式中，h_1 是树的最大高度(m)；h_2 和 h_3 决定了曲线形状(h_2 是陡峭参数，h_3 是曲率参数)；D 是树的胸径(cm)

(2) 横截面直径 d：

$$d = D\left[a_0 + a_1\left(\frac{h}{H}\right) + a_2\left(\frac{h^2}{H^2}\right)\right]^{1/2}$$

式中，h 是相对树底部的高度(m)，a_0, a_1 和 a_2 是参数。

(3) 边材宽度(sapwood width) (S_W)可表达为：

$$S_W = c_1[1-\exp(c_2D)]$$

式中，c_1 和 c_2 是参数。

(4) 树木的体积(V) 可表达为：

$$V = a_1D_{1.3}^{a_2}H^{a_3}$$

式中，$D_{1.3}$ 是当树木高度为 1.3m 时的直径，a_1，a_2 和 a_3 是可调整的参数。

(5) 树干、树皮和树枝的生物量 B_i 可表达为：

$$B_i = aD_{1.3}^b$$

式中，a 和 b 同归参数。

(6) 最佳树径增长 D_{inc} 可通过下式估计：

$$D_{inc} = rL(1 - DH / D_{max}H_{max}) / DH_{max}[-Db_2b_3\exp(b_2D)(1-\exp(b_2D))^{b_3-1} + 2[1-\exp(b_2D)]^{b_3}$$

式中，$bi(i=1,2,3)$，是 Richard 高度异速生长参数。

(7) 中国温带森林中单颗树木的死亡概率可用下式确定：

$$P_n = 1 - 0.02^{1/A_{max}}$$

式中，P_n 是一棵树由于自然原因死亡的概率；A_{max} 是这个树种的最大可能寿命。

冠层水分含量 ct 的计算模型

Dawson T P, Curran P J, North P R J et al：叶生物化学吸收性质在森林冠层反射中的传播 Remote Sensing of Environment, 1999, 67

$$ct = f_{wc} \cdot A_{sl} \cdot l_{la} \cdot K_c / 100$$

式中，f_{wc} 是叶水分含量(%)；A_{sl} 是特定叶片面积，l_{la} 是叶面积指数；K_c 是冠层覆盖百分率。

邻体干扰指数 / 改进模型

张跃西，钟章成：木本植物邻体干扰研究进展. 生态学杂志，1999, 18(2)

$$I = \sum S_i^2 S_t^{-1} d_i^{-2}$$

式中，S_t 为基株胸面积；S_i 为邻体胸面积；d_i 为基株到第 i 邻体的距离。

度量克隆植物繁殖适合度的新公式

陈尚，马艳，李自珍等：克隆植物种子繁殖和营养繁殖的适合度分析和度量. 生态学报，1999, 19(2)

(1) 繁殖在个体水平的适合度 F_i 模型：

$$F_i = \sum_{i=1}^{N} A_i N_{si}$$

式中，N 为繁殖产生的成功新个体的数量；A_i 为第 i 个新个体占据的生境范围，包括地上和地下空间；N_{S_i} 为第 i 个新个体占据生境的生态适宜度。

(2) 繁殖在基因水平的适合度 F_g 模型：

$$F_g = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(1-\sum_{j=1}^{M}P_{ij}^2\right)}{N}$$

式中，P_{ij} 为第 i 个基因位点第 j 个等位基因的频率；N 为总的基因位点数；M 为第 i 个基因位点等位基因数。

阔叶林的生物量扩展系数

Brown S L, Schroeder P E：美国东部森林的地面产量与木质生物死亡率的空间模式. Ecological Applications, 1999, 9(3)

$$F_{be} = \exp(1.912 - 0.344\ln GSV)$$

式中，V_{gs} 是指成长的树干的体积。

树高生长模型

邓红兵，郝占庆，王庆礼等：红松单木高生长模型的研究. 生态学杂志，1999, 18(3)

(1) 双曲线型：

$$H = \frac{A^2}{aA^2 + b}$$

(2) Logistic 方程：

$$H = \frac{K}{1+ae^{-bA}}$$

(3) Mitscherlich 方程：

$$H = K(1-ae^{-bA})$$

(4) 三参数的 Richards 方程：

$$H = K(1-e^{-bA})^c$$

(5) 三参数的 Richards 方程：

$$H = K(1-ae^{-bA})^c$$

式中，H 为树高；A 为年龄；K、a、b 和 c 均为待求的参数

水稻生长动力学方程

李太贵，徐兴、陈衍等：水稻数值抗冷性的研究，生态学杂志，1999，18(3)

$$m\frac{d^2y}{dt^2}+c\frac{dy}{dt}+ky=f$$

式中,m,c,k 为系统参数,植物生长的不同阶段,其值也是不同的。可用动力学参数识别法识别。

耗氧率模型

林小涛，梁旭方，吴杰等：温度对罗氏沼虾亲虾代谢的影响，生态学杂志，1999，18(3)

$$Y = \frac{(C_0-C_1)V}{WT}$$

式中，$Y(mg\cdot g^{-1}\cdot h^{-1})$ 耗氧率或 NH_3-N 排泄率或 CO_2 排出率；C_0 为实验结束时对照瓶中 DO 含量或代谢瓶中 NH_3-N、CO_2 含量；C_1 为实验结束时代谢瓶中 DO 含量或对照瓶中 NH_3-N、CO_2 含量；V 为代谢瓶容积；W 为实验虾湿体重；T 为实验时间。

埃迪协方差

Fuentes J D, Wang D：温带混生林中橡胶基质排放的季节性，Ecological Applications, 1999, 9(4) 1118-1131

(1) 动量能量(τ)：

$$\tau = -\rho\overline{u'w'}$$

式中，ρ 是指空气密度，它表示在 30 分钟的测量期间所得到的平均值；u' 是指纵向风速；w' 是指垂直风速变幅；符号 - 代表协方差。

(2) 实际热通量(H_v)：

$$H_v = -\rho C_P\overline{w'T_V'}$$

式中，ρC_P 代表空气的热容量；T_V' 是从平均值中得到的实际温度变幅。

(3) H_2O 和 CO_2 净通量(F_n)：

$$F_n = \overline{w'\rho_x'} - F_c$$

式中，ρ_x' 代表水蒸气或 CO_2 密度的变幅；F_c 是指由于空气密度中热量和湿度的波动所引起的通量修正值。

(4) 生态系统中 CO_2 的净吸入量(F_{eco})：

$$F_{eco} = F_n - \frac{\Delta\rho_{CO_2}}{\Delta t}z_r$$

式中，$\frac{\Delta\rho_{CO_2}}{\Delta t}$ 是指在临时系统的 z_r 高度处在 30 分钟内的量期间的变化。

(5) 橡胶基质通量 F_χ：

$$F_\chi = \frac{u_*k(z-d)}{\phi_h}\frac{\partial\chi}{\partial z}$$

式中，ϕ_h 表示热量的透热影响函数；u_* 表示磨擦速度；k 是指卡门常数；d 代表森林的 0 度平面的排水量，$\partial\chi/\partial z$ 是指橡胶基质源上的两个平面之间的浓度梯度值。

(6) 完整形式的橡胶基质通量 F_χ：

$$F_\chi = \frac{ku(\chi_{zU}-\chi_{zL})}{\ln\frac{z_U-d}{z_L-d}+\psi_\chi\frac{z_L-d}{L}-\psi_\chi\frac{z_U-d}{L}}$$

式中，χ_{zU} 和 χ_{zL} 分别代表在地面上的上(z_U = 42 m)下(z_L = 30 m)两个位置测得的排向空气的橡胶基质浓度；L 是指莫宁-欧比克厚(Monin-Obukhov)长度比例尺；ψ_χ 代表在测值点 χ_{zU} 和 χ_{zL} 的剖面 χ 的透热修正函数。

微量气体通量预测的全球植被动力学模型

Potter C S, Klooster S A：植物功能类型与生物活动产生的微量气体通量预测的全球植被动力学模型，Global Ecology and Biogeography, 1999, 8

(1) 植被绿色势能指数(G_{pv})：

当 D_{gd}<3000：

$$G_{pv_{max}}=\exp(0.715\ln D_{gd}+0.377\ln T_{pp}-0.448)$$

当 D_{gd}=3000：

$$G_{pv\,max} = 189.89 I_{am} + 44.02 \ln T_{pp} + 227.99$$

$$G_{pv\,min} = \exp(7.639\times10^5 D_{gd} + 5.073\times10^3 T_{pp} - 0.499\ln D_{cd} + 4.054)$$

式中，D_{gd}是生长期天数；T_{pp}是年降水量；I_{am}是年湿润指数；D_{cd}寒冷期天数。

(2) 光合作用有效辐射吸收率(F_{PAR})：

$$F_{PAR} = \min\left(\frac{S_r}{S_{r\,max} - S_{r\,min}} - \frac{S_{r\,min}}{S_{r\,max} - S_{r\,min}} \times 0.95\right)$$

$$S_r = \frac{1+G_{pv}}{1-G_{pv}}$$

式中，S_{rmin}表示没有植被覆盖的地区的S_r，所有的栅格都取值1.08。

(3) 月净初级生产力(P_{np})：

$$P_{np} = SF_{PAR}\varepsilon_{max}TW$$

式中，S是表面日光辐照度；ε_{max}是光利用效率；T是温度；而W表示湿度。

兼容性立木生物量模型

曾伟生，骆期邦，贺东北：兼容性立木生物量非线性模型研究．生态学杂志，1999，18(4)

$$W = C_0 D^{C_1} H^{C_2} V$$

式中，D为胸径；H为树高。

细根净生产力和周转率模型

温达志，魏平，孔国辉等：鼎湖山南亚热带森林细根生产力与周转．植物生态学报，1999，23(4)

$$M = M_{max} - M_{min} + D$$

$$P = P_{max} - P_{min} + M$$

$$T = P/Y$$

式中，M、P、D、T分别代表细根年死亡量、年生长量、年分解量和周转率；M_{max}，M_{min}分别为死细根现存量最大值和最小值；P_{max}，P_{min}和Y分别为活细根现存量最大值、最小值和平均值。

个体繁殖贡献率模型

陈小勇，宋永昌：黄山青冈个体繁殖贡献率。生态学报，1999，19(5)

(1) 幼苗中配子型i的比率ϕ_i模型：

$$\phi_i = \frac{1}{N_p}\sum\sum R_{ij} n_j$$

式中，R_{ij}为配子i由亲本基因型j形成的概率；n_j为基因型为j的亲本数目；N_p为亲本个数。

(2) 亲本繁殖贡献率$Fs(i)$模型：

$$Fs(i) = \frac{\sum_{k}^{N_{SG}} f(i,k) n_k}{\sum_i \sum_k^{N_{SG}} f(i,k) n_k}$$

$$\sum Fs(i) = 1$$

式中，$f(i,k)$为基因型为i的成体的贡献率；n_k为基因型为k的幼苗数；N_{SG}为繁殖个体基因型数目。

总体分枝率 R_b

孙书存，陈灵芝：辽东栎植冠的构型分析．植物生态学报，1999，23(5)

$$R_b = \frac{N_T - N_S}{N_T - N_1}$$

式中，N_T为所有枝条中枝条的总数；N_S为最高枝级的枝条数；N_1为第一级的枝条总数。

抗张强度增量模型

周跃，陈晓平等：云南松侧根对浅层土体的水平牵引效应的初步研究．植物生态学报，1999，23(5)

$$F_p = \varepsilon K$$

$$\Delta\tau_T = \frac{F_{Tf}}{A_b}$$

$$F_{Tf} = F_{pf} - F_{r\,max}$$

式中，K为电阻-拉力转换系数；F_{pf}为F_p在土墩被剪破时的最大拉力；$F_{r\,max}$为土墩由于土壤本身的抗剪强度而产生的最大抗拉力；A_b为给定垂直横截面积；$\Delta\tau_T$为抗张强度增量。

克隆植物繁殖适合度模型

何池全，赵魁义，余国营：湿地克隆植物的繁殖对策与生态适应性．生态学杂志，1999，18(6)

$$F_i = \sum A_i \cdot S_{n\,i}$$

$$NS_i = \sum S_{n\,ij}$$

$$S_{n_{ij}}=\begin{cases}0 & (X_j<X_{j\min}\text{或}X_j>X_{j\max})\\ \dfrac{X_j-X_{j\min}}{X_{j\text{opt}}-X_{j\min}} & (X_{j\min}\leqslant X_j\leqslant X_{j\text{opt}})\\ \dfrac{X_j-X_{j\max}}{X_{j\text{opt}}-X_{j\max}} & (X_{j\text{opt}}<X_j\leqslant X_{j\max})\end{cases}$$

式中，F_1为繁殖在个体水平上的适合度；N为繁殖产生的成功新个体的数量；A_i为第i个新个体占据的生境范围，包括地上和地下空间；S_{n_i}为第i个新个体占据生境的生态适宜度；$S_{n_{ij}}$为第i个新个体占据生境中第j个生态因子的生态适宜度；X_j为第j个生态因子的实测值；$X_{j\min}$、$X_{j\text{opt}}$和$X_{j\max}$分别为湿地克隆植物适应第j个生态因子的下限值、最优值和上限值。

旗叶光合日总量 P_a 模型

刘允芬，张宪洲，张谊光等：西藏高原田间冬小麦旗叶光合作用研究 植物生态学报，1999，23(6)

$$P_a=\int_{t_1}^{t_2}P_{nt}\mathrm{d}t$$

$$P_n=\frac{aIP_{\max}}{aI+P_{\max}}-R_d$$

式中，P_{nt}为t时段所观测的旗叶净光合速率；t_1，t_2分别为日出日落时间；$P_{\max}$为表观最大光合速率；I为入射到叶子上的光量子通量密度；R_d为表观暗呼吸速率；a为表观初始光能利用效率，它表征光合作用中的光能最大转化效率。

红树林的间距、衰老及邻域竞争模型

Berger U, Hildenbrandt H：具有空间属性的森林动力学模型的新方法-红树林的间距、衰老及邻域竞争 Ecological Modelling, 2000, 132

(1) 邻域场方法(field of neighborhood, F_{ON})：

单颗树的领域场：

$$F_{ON}(r)=1\qquad (0\leqslant r\leqslant r_{bh})$$

$$F_{ON}(r)=e^{-c(r-r_{bh})}\qquad (r_{bh}\leqslant r\leqslant R)$$

$$F_{ON}(r)=0\qquad (r>R)$$

式中，$F_{ON}(r)$为某个生物个体(如树)的邻域场的取值；r为作用点到树的距离；r_{bh}为树的胸径的一半；R为影响区(zone of influence，Z_{OI})的半径，其计算公式可表达为$R=a\sqrt{r_{bh}}$，a为标度参数。

N颗树产生的邻域场可表达为：

$$F(x,y)=\sum_N F_{ON}(x,y)$$

其他树施加在第k颗树的影响区(Z_{OI})上的邻域场的平均值可表达为：

$$F_A^k=\frac{1}{A}\sum_{n\neq k}\int_{A'}F_{ON_n}(x,y)\mathrm{d}a'$$

式中，A为第k颗树的影响区面积；积分区间A'是第n颗树的影响区与第k颗树影响区的重叠区。

(2) 于F_{ON}方法的红树林动力学模型——KIWI模型：

生长方程：

$$\frac{\Delta d_{bh}}{\Delta t}=\frac{G\cdot d_{bh}[1-d_{bh}\cdot H/(d_{bh}\cdot H_{\max})]}{274+3b_2\cdot d_{bh}-4b_3\cdot d_{bh}^{\,2}}S(U)C(F_A)$$

$$H=137+b_2d_{bh}-b_3d_{bh}^{\,2}$$

$$C(F_A)=1-2F_A$$

式中，H为树高；G为生长常数；$H_{\max}$为最大树高；$S(U)$为盐分影响因子；函数$C(F_A)$表示了树与树之间的竞争；b_2，b_3为树高与胸径的关系常数、空间位置(x,y)处小树的成活率，$P_{Sap}(x,y)=1-2F(x,y)$。

森林动态过程模拟的林隙模型

Hall G M J, Hollinger D Y：用一个综合的温带森林林隙模型来模拟新英格兰森林动态过程 Ecological Applications, 2000, 10(1)

(1) 新英格兰森林地被物的有效光(I)：

$$I=\exp\{-F/[833.3(1/0.8)\mathrm{SLM}]\}$$

式中，F是每个地块的植物量(g)；833.3 是一个反映地块大小的系数；SLM是每单位面积的叶面植物量。

(2) 新英格兰林冠范围内的叶产量模型L_c：

$$L_c=1.54+0.457W_s$$

式中，W_s是植物生长的有效水。

空气中 CO_2 富集的条件下密林中气体交换、叶面氮与生长效率的估算模型

Curtis P S, Vogel C S, Wang X Z et al：空气中CO_2富集的条件下，密林中气体交换、叶面氮与生长效率 Ecological Applications, 2000, 10(1)

(1) 增长的度量：

每一植物的总叶面积(A_l)可通过对每一叶面积(A_{li})求和而得到，而每一叶面积可由下式估算：

$$A_{l_i} = x_1(L_l L_w) + y_1$$

式中，L_l 是指叶的长度，L_w 是指叶的宽度，x_1 和 y_1 是某一特定基因型的衰退系数。

A_l 也可通过计算各树枝的叶面积(A_{lb})的总和而得到：

$$A_{lb} = w_b B_d + x_b B_l + y_b(B_l B_d) + z_b$$

式中，B_l 是指树枝的长度；B_d 是指树枝的底面直径；w_b、x_b、y_b 和 z_b 是某一特定基因型的衰退系数。

(2) 估算年度树径体积的增加值(地上木材体积增长率) E_v 及收获的径干的干物质量 E_{dm}：

$$E_v = \frac{V_n - V_{n-1}}{d_n L_{a_n}}$$

$$E_{dm} = \frac{S_{dm}}{401 \times \sum_{n=1994}^{1996} L_{a_n}}$$

式中，V_n 是估算的在第 n 年的径干体积；L_{an} 是估算的在第 n 年的叶面积；d_n 是第 n 年自发叶后的天数；S_{dm} 是收获的径干的干物质量。在整个研究过程中有 401 天叶面受阳光照射。

(3) CO_2 对多年呼吸作用及组织类型的影响可以通过计算在置信区间为 95%时的平均 CO_2 效应来估算：

$$\overline{L} = \frac{\sum_{i=1}^{k} w_i L_i}{\sum_{i=1}^{k} w_i}$$

式中，$L_i = \tan(\overline{X}_{ei} / \overline{X}_{ai})$ 第 i 套测量方法顶部测量值 ($\overline{X}_{ei}$) 与周边测量值 ($\overline{X}_{ai}$) 的比率的对数值；w_i 是总方差 L_i 的倒数。

北极冻原景观中 CO_2 通量尺度测量的生理学模型

Vourlitis G L, Oechel W C, Hope A et al：北极冻原景观中 CO_2 通量尺度测量的生理学模型。Ecological Applications, 2000, 10(1)

(1) 总的初级生产量的日变化(G_{pp})为：

$$G_{pp} = \frac{aQb}{aQ + b}$$

式中，Q 是指每天的发生光合作用的光子通量密度 (P_{ped})；a 是估计的量子产额；b 是指在饱和 P_{ped} 的条件下 G_{pp} 的最大速度。

(2) 整个生态系统每天的呼吸作用的季节性变化 (R)：

$$R = a\exp(bT)\exp(cW)$$

式中，T 是日平均气温；W 是指地下水位的深度；a 是指在温为度 $T = 0$ ℃时估测的呼吸作用速度；b 是指呼吸作用的温度灵敏度；c 是系数。

(3) 日综合 G_{pp} 的季节变化可用日平均 $P_{ped}(Q)$ 的双曲线函数来表示，它是建立在 G_{pp} 和 N_{dvi} 的协方差的农田观值的基础上：

$$G_{pp} = \frac{a}{1 + \exp[b - (c \cdot N_{dvi})]} \frac{dQe}{dQ + e}$$

式中，a、b、c、d 和 e 都是系数。

净光合速率 P_n

刘允芬，张宪洲，周允华等：西藏高原田间冬小麦的表观光合量子效率．生态学报，2000，20(1)

$$P_n = \frac{\alpha I P_{max}}{\alpha I + P_{max}} - R_d$$

式中，I 为入射到叶片上的光量子通量密度；P_{max} 为表观最大光合速率；R_d 为表冠暗呼吸速率；α 为表观初始光能利用效率。

阶段死亡率 M

苏建伟，盛承发：叶色草蛉幼虫的饥饿耐受性研究．生态学报，2000，20(2)

$$M = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma} \cdot e - \frac{(T - T_{50})^2}{2\sigma^2}$$

式中，T_{50} 为耐饥时间，即饥饿半致死时间。

光合、暗呼吸速率模型

孙书存，陈灵芝：东灵山地区辽东栎叶的生长及其光合作用．生态学报，2000，20(2)

$$P_n(R_d) = \Delta CO_2 \cdot F \cdot \frac{10^{-6}}{22.4} \cdot \frac{1}{60} \cdot \frac{100^4}{L_a} \cdot \frac{272}{273 + T} \cdot \frac{P}{P_0}$$

式中，P_n 为净光合速率；R_d 为暗呼吸速率；ΔCO_2 为气源气与经叶室流出的空气 CO_2 浓度差；F 为流经叶室的空气流速；L_a 为叶面积；T 为叶室温度；P_0 为标准大气压；P 为测定时气压。

森林生长模型

雷相东，唐守正：森林经营对群落α多样性影响的定量研究进展．生态学杂志，2000，19(3)

$$y_{t+1}=G(y_t-h_t)+c$$

式中，G 为包含径阶转移概率的矩阵，转移概率与林分年龄、立地条件和密度有关；$y_t=[y_{i,t}]$，$i=1,2,\cdots,n$，n 为径阶；$y_{i,t}$ 为 t 时刻 i 径阶的单位面积株数；$h_t=[h_{i,t}]$，$h_{i,t}$ 为 t 时刻 i 径阶的单位面积采伐株数；向量 c 的第一行为与林分状态无关的进入起测径阶部分。

木质部栓塞化生理生态效应模型

张硕新，申卫军，张远迎：六种木本植物木质部栓塞化生理生态效应的研究．生态学报，2000，20(5)

(1) 栓塞程度模型：

$$L_{hc}(\%)=\frac{HC_{max}-HC_{min}}{HC_{max}}\times 100\%$$

式中，$L_{hc}(\%)$ 为导水率损失；HC_{min} 为冲洗前切段的初始导水率；HC_{max} 为反复冲洗后切段所达到的最大导水率。

(2) 木质部栓塞程度 y 模型：

$$y=ae^{\frac{b}{x}}$$

$$y=\frac{x^2}{a+bx^2}$$

式中，x 为水势；a，b 为参数。

矩阵模型与扰动分析

Kammenga J E, Van Gestel C A M, Hornung E：土壤无脊椎动物中生命历史敏感性向压力的转换．Ecological Application, 2001, 11(1)

(1) 下式是一个线性的时间不变量模型：

$$\boldsymbol{n}(t+1)=\boldsymbol{M}\times\boldsymbol{n}(t)$$

式中，$\boldsymbol{n}(t)$ 是在时间 t 时的这一阶段的种群向量；$\boldsymbol{M}$ 是种群的投影矩阵。

(2) 种群增长的渐近率可用矩阵 $\boldsymbol{M}$ 的优势特征值 λ 来表示，λ 的敏感性反应种群矩阵中某一元素的附加变化影响或死亡率，它可用下式计算：

$$\frac{\partial\lambda}{\partial a_{ij}}=\frac{v_i\times w_j}{\boldsymbol{V}\cdot\boldsymbol{W}}$$

式中，$\boldsymbol{V}$ 和 $\boldsymbol{W}$ 分别表示相应的左右特征向量；v_i 和 w_j 分别代表 $\boldsymbol{V}$ 的第 i 个和 $\boldsymbol{W}$ 的第 j 个元素。

(3) 弹性 e_{ij} 可用矩阵元素 a_{ij} 的贡献与 λ 的比值来表示：

$$e_{ij}=\frac{a_{ij}}{\lambda}\frac{\partial\lambda}{\partial a_{ij}}$$

式中，λ 对低水平死亡率的弹性可用链式法则来计算。对任何参数 x，有 $e(x)=\frac{x}{\lambda}\sum_{i,j}\frac{\partial\lambda}{\partial a_{ij}}\frac{\partial a_{ij}}{\partial x}$

Farquhar 光合作用模型

Luo Y, Medlyn B, Hui D et al：樱桃林的总初级生产力：CO_2 实验与涡流数据的模型集成．Ecological Application, 2001, 11(1)

(1) 光合作用由下式的最小值给出：

$$A_V=V_{c\max}(C_i-\Gamma^*)/[C_i+K_C(1+O/K_O)]-R_d$$

$$A_J=(J/4)(C_i-\Gamma^*)/(C_i+2\Gamma^*)-R_d$$

与以上公式相联系的有 Ball-Berry 气孔传导模型：

$$g_s=g_0+g_1A_nRH/C_a$$

式中，A_V 由羚化作用限制的叶面光合作用；A_J 是由于 RuBP 再生所限制的叶面光合作用；$V_{c\max}$ 是最大的 RuBP 碳酸酵素活性；C_i 是指细胞间 CO_2 的浓度；Γ^* 是 CO_2 补偿点；K_C 是麦克利斯－门顿 (Michaelis-Menten) 的 CO_2 常数；O 是氧的局部压力；K_O 是麦克利斯－门顿的氧的常数；R_d 是叶的夜间呼吸作用速度；J 是电子传播速度；g_s 是所孔传导系数；g_0 和 g_1 是经验系数，A_n 是净光合作用速度，其最小值为 A_V，最大值为 A_J；R 是通用气体常数；H 温度依赖系数；C_a 是大气中的 CO_2 浓度。

(2) 光对 J 的依靠性由下式的非矩形双曲线确定：

$$\theta J^2-(a\alpha I+J_{max})J+a\alpha IJ_{max}=0$$

式中，θ 是曲率；α 是指在低量子密度时，电子传输的最初量子量；a 叶子的辐射吸收率；I 是指瞬时光子能量密度；J_{max} 是电子的最大传输率。

呼吸作用和环境变量之间的关系

Phillips N, Oren R：树林蒸腾作用的年际变化和年内变化．Ecological Applications, 2001, 11(2)

$$E_L=E_{L\max}f_1(Q_p)f_2(D_Z)f_3(\theta)$$

式中，E_L 每单位叶面积的林冠蒸腾作用；Q_p 是白天光合作用的平均光子通量密度；D_Z 是在空气饱和压力不足的情况下白昼平均的小时数；θ 是白天土壤的平均单位体积的水含量；$E_{L\max}$ 是 E_L 的最大值；f_1 和 f_2 是指数饱和曲线；f_3 是指数衰变曲线。

基于 D_Z 的另一个简单方程式：

$$E_L = k_1 D_Z /(k_2^{D_Z})$$

式中，k_1 和 k_2 是经验适配参数。

小麦残茬落叶分解动态模型

张崇邦，张忠恒：小麦残茬落叶的分解与土壤因子间动态关系的研究．生态学杂志，2001，20(2)

$$Y(t) = \frac{52.3976}{1+9.6283e^{-0.9215t}}$$

式中，$Y(t)$ 为有机质含量；t 为月。

反应指数 *RI*

安黎哲，冯虎元，王勋陵：增强的紫外线-B 辐射对几种作物和品种生长的影响．生态学报，2001，21(2)

$$RI = \left(\frac{PHt - PHc}{PHc} + \frac{TDWt - TDWc}{TDWc} + \frac{LAt - LAc}{LAc}\right)\times 100$$

式中，PH 为植物高度；LA 为测量叶面积；TDW 为称得的总干重；t 为 UV-B 处理；c 为对照。

模糊评价模型

翁德宝，黄雪方，杨恭峰：四种南京地产栽培野菜蛋白质营养价值的评价研究．自然资源学报，2001，16(3)

$$\mu(a,u_i) = 1 - 0.09\sum_{k=1}^{8}\frac{|a_k - u_{ik}|}{a_k + u_{ik}}$$

式中，$a_k(k=1,2,\cdots,8)$ 即为标准蛋白 a 的 8 种 EAA 含量；u_{ik} 为第 i 个评价对象的第 k 种 EAA 含量，最后按贴近度值大小顺序排列；贴近度值反映评价对象蛋白质质量与标准蛋白质 a 的接近程度；μ 的值越接近 1，其蛋白质营养价值相对越高。

食物生态位宽度与重叠度模型

马小梅，计翔：中国石龙子个体发育过程中头部两性异型和食性的变化．生态学杂志，2001，20(3)

(1) 食物生态位宽度 B 模型：

$$B = \frac{1}{\sum p_i^2}$$

式中，p_i 为实际利用的第 i 种食物在所有被利用的食物中所占的比例。

(2) 食物生态位重叠度(O_{jk}或O_{kj})模型：

$$O_{jk} = O_{kj} = \frac{\sum p_{ij}p_{ik}}{\left(\sum p_{ij}^2 \sum p_{ik}^2\right)^{1/2}}$$

式中，p_{ij}，p_{ik} 分别为被 j 和 k 种类或性别组动物利用的第 i 种食物在所有被利用的食物种所占的比例。

对虾继饥饿后的补偿生长的计算模型

吴立新，董双林，田相利：中国对虾继饥饿后的补偿生长研究．生态学报，2001，21(3)

(1) 虾的生长率 R_{sg} 模型：

$$R_{sg} = 100\frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t}$$

(2) 摄食率 R_f 模型：

$$R_f = 100\frac{C}{t\frac{W_1 + W_2}{2}}$$

(3) 食物转化率 R_{fc} 模型：

$$R_{fc} = 100\frac{W_2 - W_1}{C}$$

式中，W_2，W_1 分别为 t_2 和 t_1 时实验虾的湿重；C 为摄食饵料的湿重；t 为实验时间。

胃排空模型

张波，孙耀，唐启升：鱼类的胃排空率及其影响因素．生态学报，2001，21(4)

$$W_t = \frac{4}{3}\rho\pi\left[\frac{L_0}{2} - d_{s0}e^{aT}(t - t_D)\right]\left[r_0 - d_{s0}e^{aT}(t - t_D)\right]^2$$

式中，W_t 为时间 t 时残留食物的重量；ρ 为食物的密度；L_0 为食物的初始长度；d_{s0} 为 0°C 时的消化速度；r_0 为食物的初始半径；a 为温度系数；t 为摄食后的时间；t_D 为消化开始时的时间延滞；T 为温度。

紫花苜蓿根系吸水模型

白文明，左强，李保国：乌兰布和沙区紫花苜蓿根系吸水模型．植物生态学报，2001，25(4)

$$S(z,t) = \alpha_1\frac{T_a(t)}{L_r(t)}\left[\frac{R(z,t)}{R_{\max}}\right]^{\alpha_2}\left(\frac{\theta - \theta_{wp}}{\theta_f - \theta_{wp}}\right)^{\alpha_3}$$

$$(\theta_{wp} \leqslant \theta < \theta_f)$$

式中，$S(z,t)$为根系吸水速率；$T_a(t)$ 为作物蒸腾强度；$L_r(t)$ 为最大扎根深度；$R(z,t)$为有效吸水根重密度；R_{max} 为最大根重密度；θ为土壤含水量；θ_{wp} 为萎蔫含水量；θ_f 为田间持水量；α_1、α_2 和α_3为拟合参数。

生物量及相对生长率模型

靖元孝，程惠青：水翁幼苗对淹水的反映初报．生态学报，2001，21(5)

（1）生物量模型：

$$W = a(D^2H)^b$$

式中，W 为各相应部分的生物量；D 为胸径；H 为株高。

（2）相对生长率 R 模型：

$$R = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{T_2 - T_1}$$

式中，W_2、W_1 分别为时间 T_2 和 T_1 时的植株干重。

响应指数 R_i

芦永辉，孔垂华，董春等：胜红蓟化感作用研究 Ⅷ．胜红蓟素类似物的合成及其对植物与微生物的抑制作用．生态学报，2001，21(6)

$$R_i = \begin{cases} 1 - \dfrac{C}{T} & (T > C) \\ \dfrac{T}{C} - 1 & (T < C) \end{cases}$$

式中，C 为对照值；T 为处理值；$R_i > 0$ 为促进；$R_i < 0$ 为抑制。

分枝率计算公式

何维明，董鸣：不同气温条件下旱柳幼苗的水分和构型特征．生态学报，2001，21(7)

$$分枝率 = \frac{N - N_s}{N - N_1}$$

式中，N 为分枝总数；N_s 为最高级分枝数；N_1 为最低级分枝数。

浮游植物和初级生产力的摄食压力模型

张武昌，王荣：海洋微型浮游动物对浮游植物和初级生产力的摄食压力．生态学报，2001，21(8)

（1）浮游植物的丰度模型：

$$P_t = P_0 e^{(k-g)t}$$

式中，P_t 为 t 时浮游植物的丰度；P_0 为开始时浮游植物的丰度；k 为浮游植物的增长率；g 为浮游动物的摄食率。

（2）浮游植物加倍时间 T_d 模型：

$$T_d = \frac{1}{n} = \frac{\ln 2}{k}$$

式中，n 为每天的加倍数。

（3）微型浮游动物对浮游植物现存量的摄食压力 P_i 模型：

$$P_i = 1 - e^g \times 100\%$$

（4）微型浮游动物对初级生产力的摄食压力 P_p 模型：

$$P_p = \frac{e^k - e^{k-g}}{e^k - 1} \times 100\%$$

第二十章　种群生态学

Lincoln 指数的贝叶斯修正模型

Gaskell T J, George B J: Lincoln 指数的贝叶斯定理修正, Journal of Applied Ecology, 1972, 9(2)

假定一个不变的种群有 N 个个体，其中 R 个个体被做了标记；假定在一个随机过程中 S 个个体被捕获，它们中的 M 个被做过标记。Lincoln (1930) 提出未知数 N 的估算可表达为：

$$\hat{N}=\frac{RS}{M}$$

Bailey (1952) 提出当 M 很小时，Lincoln 指数应该被修正为：

$$N=\frac{R(S+1)}{M+1}$$

在引文中，Lincoln 指数的 Bayesian 修正被提出：

$$\hat{N}=L-\frac{B(L-A)}{M+B}$$

式中，A 是 N 的先验估计；$B=q-1$；q 是先验分布的参数；$L=(RS)/M$。

绿色生物量的净变化率模型

Noy-Meir I: 季节性草原的放牧和生产－简单模型的分析, Journal of Applied Ecology, 1978, 15

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}=G-cH$$

式中，V 是总的绿色生物量；G 是绿色生物量的生长率；c 是一只动物对绿色生物量的消费率；H 是动物的种群密度

$$G=\min[gV,m(V_m-V)]$$

式中，g 是低生物量时的相对增长率；V_m 是没有放牧时的最大生物量；m 是相对生物量损失率。

(1) 阶段 1：

生物量的净变化：

$$\dot{V}=gV-sHV$$

$$V=V_0e^{(g-sH)t}$$

式中，V_0 是在时间 $t_0=0$ 时的初始绿色生物量。

(2) 阶段 2：

$$\dot{V}=gV-c_sV$$

$$V=\frac{c_s}{g}H+\left(V_s-\frac{c_s}{g}H\right)e^{g(t-t_s)}$$

式中，c_s 是饱和(最大)消费率；V_s 是饱和消费所达到的生物量；$t_s=\frac{1}{g-sH}\ln\frac{V_s}{V_0}$，是绿色生物量到达 V_s 的时间，当 $V=V_x$，阶段 2 将会在时间 t_x 结束，增长达到最大值时，可表达为：$t_x=t_s+\frac{1}{g}\ln\frac{V_x-(c_s/g)H}{V_s-(c_s/g)H}$。

(3) 阶段 3：

一旦 V 超过 V_x，则：

$$\dot{V}=G_x-m(V-V_x)-c_sH$$

$$V=V_x+\frac{G_x-c_sH}{m}\left[1-e^{-m(t-t_x)}\right]$$

种群的动力学模型

Kowalski R, Benson J F: 小麦球蝇 Delia Coarctata 问题的种群动力学方法, Journal of Applied Ecology, 1978, 15

(1) 幼虫数量方程：

$$\lg N_{larvae}=1.46(\lg N_{eggs}+\lg N_{shoots})-12.56$$

(2) 成体数量方程：

$$\lg N_{adults}=0.77\times\lg N_{larvae}+0.81$$

(3) 对数潜在卵的估算和方程估算的实际卵：

$$\lg(N+1)_{eggs}=\lg N_{potential\ eggs}+8.84-1.21[\lg N_{eggs}-0.25\lg N_{potential\ eggs}]$$

沼泽莺的基本生活史模型

Nichols J D, Hensler G L, Sykes P W et al: 沼泽莺的种群统计学－一种群控制的含义, Ecological Modelling, 1980, 9

(1) 对于沼泽莺的生活史，净繁殖率 R_0 被计算为：

$$R_0=\sum_{x=0}^{t} l_x m_x=0.44bp_y p_a^2 \qquad (0 \leqslant p_a<1)$$

式中，l_x 是年龄类别为 0 (刚会飞的鸟)的个体存活到下一个年龄类别 x 的概率；m_x 是年龄类别 x 的存活雌鸟生产的雌性雏鸟的预期数量；R_0 的值来自于每年不同的第一年存活率 p_y 和成体存活率 p_a 的组合；计算中假定 b 的值为 0.833；R_0 对应于任何不同的 b 值，称为 b'，其计算公式为 $R_{0(b')}=R_{0(b)}b'/0.833$。

1) 一个种群的有限的增长率(λ)被定义为下面方程的单个的正实数根：

$$1=\sum \lambda^{-x} l_x m_x=0.44bp_y p_a^2/\left[\lambda^2(\lambda-p_a)\right]$$

$$(0 \leqslant p_a<1 \quad 且 \quad \lambda>p_a)$$

2) 年龄段为 x 的个体的再生产价值被定义为：

$$v_x/v_0=(\lambda^x/l_x)\sum_{y=x}^{x}\lambda^{-y} l_y m_y$$

式中，对于年龄为 1 的沼泽鸢 $v_0=1$；
$v_1=0.44bp_a^2/\left[\lambda(\lambda-p_a)\right]$，$0 \leqslant p_a<1$ 且 $\lambda>p_a$；
$v_2=0.44bp_a/(\lambda-p_a)$；$v_x=0.44b\lambda/(\lambda-p_a)$，$x>3$。

(2) 基本鸢生活史的修正：

这些修正包括发育时间和衰老。发育时间指性成熟或者第一次繁殖的年龄，定义 τ 为以年为单位的发育时间，且 $\tau \geqslant 1$，则 R_0 的一般方程变为：

$R_0=0.44bp_y p_a^{\tau-1}/(1-p_a)$，$\tau \geqslant 1$ 且 $0<p_a<1$；

同样，λ 的更一般的方程为：$\lambda^T-p_a\lambda^{\tau-1}-0.44bp_y p_a^{\tau-1}=0$，$\tau \geqslant 1$，$0<p_a \leqslant 1$ 且 $\lambda>p_a$。

另外，鸢模型的衰老因子通过结合最大年龄 $\omega-1$ 而建立，大于这个值则不会有繁殖发生。结合了衰老因子的种群增长方程为：

$$R_0=0.44b(1-p_a^{\omega-3})p_x p_a^2/(1-p_a)$$

$$(\omega \geqslant 3 \quad 且 \quad 0<p_a<1)$$

$$\lambda^3-p_a\lambda^2-0.44b[1-(p_a/\lambda)^{\omega-3}]p_y p_a^2=0$$

$$(\omega \geqslant 3 \quad 0<p_a \leqslant 1 \quad 且 \quad \lambda>p_a)$$

衰老模型的新的生产价值方程为：

$$v_1=[0.44b/(\lambda-p_a)][(p_a^{3-\omega}-\lambda^{3-\omega})/\lambda p_a^{1-\omega}]$$

$$(\omega \geqslant 3 \quad 0<p_a \leqslant 1 \quad 且 \quad \lambda>p_a)$$

$$v_2=[0.44b/(\lambda-p_a)][(p_a^{3-\omega}-\lambda^{2-\omega})/\lambda p_a^{2-\omega}]$$

$$(\omega \geqslant 3)$$

$$v_x=[0.44\lambda b/(\lambda-p_a)][1-(\lambda/p_a)^{x-\omega}]$$

$$(\omega \geqslant 3 \quad 且 \quad 3 \leqslant x<\omega)$$

物种竞争模型

Abdelkader M A：一个带有时间变化率的通用双物种竞争模型 Ecological Modelling, 1980, 10

$$x'/x=r(t)-f(X,Y)$$

$$y'/y=s(t)-g(X,Y)$$

式中，$x(t)$ 和 $y(t)$ 表示两个物种中个体的数量；$r(t)$ 和 $s(t)$ 是两个物种的 Malthusian 内在的增长率；$X=\alpha(t)x$，$Y=\beta(t)y$；函数 $\alpha(t)$ 和 $\beta(t)$ 是与时间正相关的函数；对于函数的非线性表达式 $f(X,Y)$ 和 $g(X,Y)$，有 $x'/x=r(t)-m_1\{\alpha(t)x\}^{\mu}-n_1\{\beta(t)y\}^{\upsilon}$，$y'/y=s(t)-m_2\{\alpha(t)x\}^{\mu}-n_2\{\beta(t)y\}^{\upsilon}$。

Logistic 种群收获模型

Gopalsamy K：logistic 种群模型中的最优稳定性和收获. Ecological Modelling, 1980, 11

(1) 收获时的种群系统可以由下面的方程描述：

$$\frac{dx(t)}{dt}=x(k-x)[1-u(t)]$$

式中，$x(t)$ 是系统的个体数；t 是时间；k 是一个正常数；u 是一个未知的非负控制变量。

收获的生态和经济成本由下面的函数描述：

$$J(x,u)=\int_0^{\infty}[F(x-k)+cu^2]dt$$

式中，F 是一个非负值的关于 $x-k$ 的未知函数；c 是一个已知正常数。

(2) 定义一个 Liapunov 函数 V：

$$V(x)=x-k-k\lg(x/k)$$

$V(x)$ 的变化率为：

$$\frac{dV[x(t)]}{dt}=-(x-k)^2-(x-k)^2u(t)$$

(3) 根据最佳稳定性理论，我们建立了下面的表达式：

$$B[V,x,u]=-(x-k)^2-(x-k)^2u+F(x-k)+cu^2$$

(4) 根据 Krasovskii 的最佳稳定性定理，当 $u=u_0$ 时，表达式 B 达到最小值 0，最优化控制满足方程：

$$\frac{\partial B}{\partial u}=-(x-k)^2/2cu=0$$

一种解法为：

$$u_0(x)=(x-k)^2/2c$$

未知函数 F 为：

$$F(x-k)=(x-k)^2+cu_0^2$$

成本函数变为：

$$J(x,u)=\int_0^{\infty}[(x-k)^2+cu_0^2-cu^2]\mathrm{d}t$$

差分模型和微分模型的算法一致性

Logofet D O：差分模型和微分模型的算法一致性 Ecological Modelling, 1981, 12

(1) 模型的种群统计学部分的矩阵方程：

$$x(t+1)=D(t)x(t)$$

式中，D 是一个由非负元素组成的种群统计学矩阵；向量 $x(t)$ 表示年龄组密度随时间 t 的动态变化，它可以转换成：$\tilde{x}(t+\Delta t)=\tilde{x}(t)+\Delta t(D-I)\tilde{x}(t)$，$I$ 表示单位矩阵。

(2) 问题在于用微分等价式替换差分模型的误差估算，误差为：

$$\delta(x)=|x(t+1)-\tilde{x}(t+n\Delta t)|$$

例如，在单位时段中的累积形成 n 个相等的时间间隔，$\Delta t=1/n$。

$$\delta(x)<\sum_i|x_i|\delta(e_i)=\sum_i|x_i|[1/2(1-1/n)(\lambda_i-1)^2e_i+O((\lambda_i-1)^3)]$$

式中，λ 和 e 分别是相应矩阵 D 的特征值和特征向量

对于活体树木的攻击过程动力学模型

Feldman R M, Curry G L, Frontalis D：地区南部松树甲虫的田间种群动力学的数学模型，Ecological Modelling, 1981, 13

(1) 对于每一棵活体树木 k：

$$a_k(t)=\begin{cases}0 & (t<t_k)\\ c(0)N_k(t_k) & (t=t_k)\\ \sum_{i=t_k}^{t-1}c(i-t_k)\alpha^{t-i-1}N_k(i) & (t>t_k)\end{cases}$$

式中，$c(s)=\begin{cases}3 & (s=0,1,2)\\ 1 & (s\geqslant 3)\end{cases}$；$a_k(t)$ 表示在第 t 天树木的吸引力；$N_k(t)$ 表示在第 t 天甲虫成功攻击树木 k 的次数；t_k 是树木 k 变得活跃的日期；$c(s)$ 表示树木变得活跃之后，由树木不稳定的 s 天产生的一个乘数因子；$\alpha(0<\alpha<1)$ 是指数式衰减因子；$N_k(t_k)$ 是当树木变得活跃时，树木中存在的甲虫的数量。

(2) $A_k(t)$ 表示第 t 天攻击树木 k 的甲虫数量，则：

$$A_k(t)=N(t)a_k(t)/\sum_j a_j(t)$$

被攻击的甲虫数量：

$$N_k(t)=\lambda_k(t)A_k(t)$$

式中，$\lambda_k(t)$ 是攻击和虫眼密度两者的函数，它表示攻击某棵树的被攻击甲虫的比例。

种群向量模型及变维矩阵模型

徐汝梅，刘来福，朱国仁等：变维矩阵模型在温室白粉虱种群动态模拟中的应用，生态学报 1981，1(2)

(1) 在 t+1 时刻的种群向量模型：

$$\boldsymbol{n}(t+1)=A\boldsymbol{n}(t)$$

式中，$\boldsymbol{n}(t)$为 t 时刻种群向量；A 为转移矩阵。

(2) 变维矩阵模型：

$$\boldsymbol{n}(t_0+2)=A(t_0+1)\,\boldsymbol{n}(t_0+1)$$

种群增长的 Leslie 矩阵计算模型

卢泽愚：种群增长的矩阵计算模型，生态学报 1981，1(3)

$$n_{t+1}=\begin{pmatrix}n_{0t+1}\\ n_{1t+1}\\ n_{2t+1}\\ \vdots\\ n_{kt+1}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}F_0 & F_1 & F_2 & \cdots & F_{k-1} & F_k\\ p_0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0\\ 0 & p_1 & 0 & \cdots & 0 & 0\\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots\\ 0 & 0 & 0 & \cdots & p_{k-1} & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}n_{0t}\\ n_{1t}\\ n_{2t}\\ \vdots\\ n_{kt}\end{pmatrix}=Mn_t$$

式中，M 为 Leslie 矩阵，其第一行为各年龄等级的生育率，其余各行只有次对角线上一个非零元素，分别

为 0 岁、1 岁、…、和 $k-1$ 岁个体能活到下一年度的存活率。

带有时滞的双物种离散时间种群模型

Agnew T T：在带有时滞的双物种离散时间种群模型中的稳定性和开发性．Ecological Modelling, 1982, 15

假定在时间 t，两个物种的成年个体数量表示为 $N_1(t)$ 和 $N_2(t)$；$\theta_1(\theta_2)$ 为物种 1(2)达到性成熟的世代数量；对于物种 i，两个物种之间的相互作用用一个函数 F_i 来定量化；对于物种 i，增殖函数表示为 D_i，它是多年前种群水平 θ_i 的函数，方程为：

$$N_1(t+1)=F_1(N_1(t),N_2(t))+D_1(N_1[t-\theta_1],N_2[t-\theta_2])$$

$$N_2(t+1)=F_2(N_1(t),N_2(t))+D_2(N_1[t-\theta_1],N_2[t-\theta_2])$$

当两个物种都达到稳定态时，系统处于平衡态，表示为 $\overline{N}_1$ 和 $\overline{N}_2$：

$$\overline{N}_1=F_1(\overline{N}_1,\overline{N}_2)+D_1(\overline{N}_1,\overline{N}_2)$$

$$\overline{N}_2=F_2(\overline{N}_1,\overline{N}_2)+D_2(\overline{N}_1,\overline{N}_2)$$

(1) 定义：

$$a_{ij}=\partial F_i/\partial N_j\big|_{(\overline{N}_1,\overline{N}_2)}$$

$$b_{ij}=\partial D_i/\partial N_j\big|_{(\overline{N}_1,\overline{N}_2)}$$

(2) 局部稳定的必要条件：

1) 必要条件 1：

$$(1-a_{11}-b_{11})(1-a_{22}-b_{22})>(a_{12}+b_{12})(a_{21}+b_{21})$$

2) 必要条件 2：

$$(1+a_{11}+(-1)^{\theta_1}b_{11})(1+a_{22}+(-1)^{\theta_2}b_{22})>$$
$$(a_{12}+b_{12}(-1)^{\theta_1})(a_{21}+b_{21}(-1)^{\theta_2})$$

3) 必要条件 3：

$$a_{11}+a_{22}+b_{11}+b_{22}<2 \qquad (\theta_1=\theta_2=0)$$

$$a_{11}+a_{22}+b_{11}<\theta_2+2 \qquad (\theta_1=0,\theta_2>0)$$

$$a_{11}+a_{22}+b_{22}<\theta_1+2 \qquad (\theta_1>0,\theta_2=0)$$

$$a_{11}+a_{22}+b_{22}<\theta_1+\theta_2+2 \qquad (\theta_1>0,\theta_2>0)$$

4) 必要条件 4 仅适用于 $\theta_1=\theta_2$ 时：

$$|b_{11}b_{22}-b_{12}b_{21}|<1 \qquad (\theta_1=\theta_2\neq 0)$$

$$(a_{11}+b_{11})(a_{22}+b_{22})-(a_{12}+b_{12})(a_{21}+b_{21})<1$$

$$(\theta_1=\theta_2=0)$$

(3) 充分条件：

如果 $1-|a_{11}|>|a_{12}|+|b_{11}|+|b_{12}|$，且 $1-|a_{22}|>|a_{21}|+|b_{21}|+|b_{22}|$，则一个解（$\overline{N}_1,\overline{N}_2$）对于小的扰动是逐渐趋于稳定的。

种的数量模型

Alekseev V V：在依赖于地理纬度的生态系统中确定种的数量的模型．Ecological Modelling, 1982, 17

(1) 对温度依赖的种的个体数量：

$$P=P_0e^{vt}$$

$$v=\mu/(RT_0^2)$$

式中，P 是系统中种的个体数量；P_0 经验常数；t 是温度；μ 是类似于化学动力学中的活化能的一个参数；R 是气体常数；$T_0=273\ \text{K}$。

(2) 利用 Zenkevich(1963, 1977)的数据，可以得到下式：

$$P=400e^{0.154t}$$

随机数学模型

张炳根：单种群增长最简数学模型的一点注释．生态学报，1982, 2(1)

$$\frac{dN}{dt}=[a+X(t)]N$$

式中，N 为时间 t 时种群的个体数；a 为内禀增长率。

常绿阔叶林的数量分类方法

党承林，姜汉侨：云南西畴县草果山常绿阔叶林的数量分类研究．生态学报，1982, 2(2)

(1) Jaccard 相似系数 IS_{sp} 模型：

$$IS_{sp}=\frac{\sum(M_w:M_g)}{a+b+c}\frac{M_c}{M_a+M_b+M_c}\times 100$$

式中，M_w，M_g 分别为样地 A 和 B 的共有种的一个较小和较大数值量；a, b 和 c 分别为出现在 A 中、B 中、A 和 B 的共有种的种数；M_c 为样地 A 和 B 共有种的数量总和；M_a 和 M_b 分别为样地 A 中、B 中独有种的数量值总和。

(2) 夹角余弦相似系数模型：

$$R_{jk}=\frac{\sum_{i=1}^{p}X_{ij}X_{ik}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{p}(X_{ij})^2\sum_{i=1}^{p}(X_{ik})^2}}$$

式中，$j,k=1,2,\cdots,N$ 为被比较的两个样地；N 为样地总数；$P=1,2,\cdots$ 为种数；X 为种的数量值。

(3) Sörensen 相似系数模型：

$$IS=\frac{200\sum_{i=1}^{p}\min(X_i,Y_i)}{\sum_{i=1}^{p}(X_i-Y_i)}$$

式中，X_i、Y_i 分别代表第 i 种在 x 和 y 样地中的数量值；$P=1,2,\cdots$ 为种数。

桔全爪螨种群动态的模糊聚类分析模型

周新远：模糊数学在生态学中的应用研究——桔全爪螨种群动态中的模糊聚类分析．生态学报，1982，2(2)

(1) 模糊聚类分析的相似矩阵模型：

$$\underset{\sim}{R}=(r_{ij})$$

$$r_{ij}=1-\frac{d_{ij}}{M}$$

式中，M 为适当选定的一个常数。

(2) 兹用-逻辑斯蒂方程：

$$Y=\frac{k}{1+e^{a-rt}}$$

式中，k 为环境"负担能力"，决定于食物、空间、捕食者及其他；r 为内禀增殖率。

种群模型的扩展形式

崔启武，Lawson G：一个新的种群增长数学模型——对经典的logistic 方程和指数方程的扩充．生态学报，1982，2(4)

$$\frac{dX}{dt}=\mu_c^*X(1-X/X_m^*)/(1-X/X'_m)$$

$$\mu_c^*=\mu_6\sin^2(\pi t/12)-D_0t^g$$

$$X_m^*=\frac{X_m[\mu_6\sin^2(\pi t/12)-D_0t^g]}{\mu_6\sin^2(\pi t/12)-X_mD_0t^g/X'_m}$$

定温条件下棉铃虫种群动态数学模拟

陈玉平，陈竞博：定温条件下棉铃虫种群动态的数学模拟与分析．生态学报，1983，3(1)

(1) 棉铃虫种群积累发育频数的数学模型：

$$F(t)=\lambda_1F_1(t)+\lambda_2F_2(t)$$

$$F_1(t)=\int_{-\infty}^{t}f_1(\tau)d\tau$$

$$F_2(t)=\int_{-\infty}^{t}f_2(\tau)d\tau$$

式中，$f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 分别为正常总体及时滞总体的发育时间分布频率函数；λ_1 和 λ_2 分别为两个总体在种群中所占的百分率($\lambda_1+\lambda_2=1$)

(2) 棉铃虫种群生殖力的数学模型：

$$Q_F=\sum_{i=1}^{n}F'(I)$$

式中，Q_F 为成虫每只总产卵量；$F'(I)$ 为第 I 个发育级中个体的卵量；n 为成虫的发育级数。

(3) 棉铃虫种群死亡率的数学模型：

$$r_e=\frac{1}{(1-F)+\frac{F}{\sqrt[n]{1-R}}}$$

$$r_d=1-r_e$$

$$r_d^{(\tau)}=\frac{1}{\left[(1-F)+\frac{F}{\sqrt[n]{1-R}}\right]^{\tau/\Delta t}}$$

式中，r_d 为每次推进之间种群的死亡率；r_e 为种群的存活率；F 为每次推进的比例；R 为总的实际死亡率；n 为发育等级数目；τ 为模拟时间步长。

羊草种群地上部分生物量模型

李月树，祝廷成：羊草种群地上部分生物量形成规律的探讨．植物生态学与地植物学丛刊，1983，7(4)

(1) 羊草种群地上部分生物量的季节动态：

羊草种群地上部分生物量模型：

$$B_t=B_{ss}e^{-ea-kt}$$

式中，B_t 为某时刻的生物量；B_{ss} 为该生境条件下可达到的生物量极大值；e 为自然对数的底；a 为常数；k 为生长常数；t 为生长发育天数(自返青之日起)

(2) 羊草种群地上部分生物量的增长速率：

平均绝对增长速度模型：

$$\overline{G}(t_{i+1}-t_i)=\frac{W_{i+1}-W_i}{t_{i+1}-t_i}$$

式中，W_{i+1} 和 W_i 分别为 t_{i+1} 时刻的生物量。

种间冲突对物种个体产量的影响模型

Jolliffe P A, Minjas A N, Runeckles VC：置换次序实验中产量关系的重新解释 The Journal of Applied Ecology, 1984, 21

(1) 农作物单作中种内冲突对物种个体产量的相对影响：

$$R_M=\frac{Y_p-Y_M}{Y_p}$$

式中，R_M 被称为"相对单作响应"；Y_p 是在没有冲突时一定密度下的期望产量；Y_M 是单位陆地面积上的植物产量。

(2) 种间冲突的相对影响被定义为：

$$R_X=\frac{Y_M-Y_X}{Y_M}$$

式中，R_X 被称为"相对间作响应"；Y_X 是在间作环境下，单位陆地面积上一个物种的产量。

周期性环境中收获种群模型

Legović T, Perić G：在周期性环境中收获种群 Ecological Modelling, 1984, 24

(1) 收获种群模型：

1) 持续限额：

$$\frac{dN}{dt}=rN(1-N/K)-q$$

2) 持续影响收获：

$$\frac{dN}{dt}=rN(1-N/K)-eN$$

式中，N 是种群中的个体数；r 是固有生长系数；K 是环境的承载力系数；q 和 eN 是生产速率。对于两者策略，最大的可持续生产率都是 $rK/4$。

在一个随机变动环境中，如果 $r(t)=r_0+\gamma(t)$，r_0 是平均值，$\gamma(t)$ 是平均等于 0 的白噪音，σ^2 是变量，那么平均产量 $\langle Y\rangle_R$ 和变量系数 CV_y 分别为：

$$\langle Y\rangle_R=Ke(r_0-e-\sigma^2/2)/r_0$$

$$CV_y=\left(\frac{\sigma^2/2}{r_0-e-\sigma^2/2}\right)^{1/2}$$

3) 最优收获效果为：

$$e_{opt}=\frac{r_0}{2}(1-\sigma^2/2r_0)$$

4) 随机变动环境的最大可持续生产率($MSAY_R$)如下：

$$MSAY_R=\frac{r_0K}{4}(1-\sigma^2/2r_0)^2$$

5) 变量的相应系数：

$$CV_{MSAY}=\frac{\sigma}{\sqrt{r_0-\sigma^2/2}}$$

(2) 周期性环境中的种群：

对于任意的常数 r，$K=K(t)=K_0+K_1\cos\omega t$，$K_0>K_1$，则有以下情况。

当 $r\ll\omega$ 时，系统的渐进解为：

$$N(t)\to\left[\frac{\omega}{2\pi}\int_0^t\frac{dt'}{K(t')}\right]^{-1}\left[1+0\left(\frac{2\pi r}{\omega}\right)\right]$$

如果忽略 $\frac{2\pi r}{\omega}$ 项，则 $N(t)\to\sqrt{K_0^2-K_1^2}$。

当 $r\gg\omega$ 时，系统的渐进解为：

$$N(t)\to(K_0-K_1\cos\omega t)\left[1+0\left(\frac{\omega}{2\pi r}\right)\right]$$

(3) 在周期性环境中的持续影响下的收获：

当 $r-e\ll\omega$，种群个体数的渐进值为：

$$N_1=\sqrt{K_0^2-K_1^2}(1-e/r)$$

M_{SY} 的渐进值为：

$$M_{SY1}=\left(r\sqrt{K_0^2-K_1^2}\right)/4$$

当 $r-e\gg\omega$ 时，长期时间里，种群趋近于 N_2，即：

$$N_2=(K_0-K_1\cos\omega t)(1-e/r)$$

一个周期中的平均生产率大约为：

$$Y_2=K_0e(1-e/r)$$

鹿种群的数学模型

Shapiro A P, Frisman E J, Skaletskaya E J：鹿种群的动力学和最优化开发模型 Ecological Modelling, 1984, 26

$$C(n+1)=rv_4W(n)$$

$$G_1(n+1)=v_1C(n)/2$$

$$G_2(n+1)=v_2G_1(n)$$

$$W(n+1)=v_4W(n)+v_2G_2(n)$$

$$B_1(n+1)=v_1C(n)/2$$

$$B_2(n+1)=v_3B_1(n)$$

$$M(n+1)=v_5M(n)+v_3B_2(n)$$

式中，$G_1(n)$ 是第一年的未成年雌鹿；$B_1(n)$ 是第一年的未成年雄鹿；$G_2(n)$ 是第二年的未成年雌鹿；$B_2(n)$ 是第二年的未成年雄鹿；$M(n)$ 是成年雄鹿；$W(n)$ 是成年雌鹿；$C(n)$ 是所有年轻小鹿的密度；n 是确定的世代数或年数；r 是繁殖力；$v_1,\cdots,v_5$ 分别是新生鹿、未成年雌鹿、未成年雄鹿、成年雌鹿和成年雄鹿的存活率。

优势植物种群竞争模型

王孝安：马衔山林区优势植物种群竞争的初步研究．植物生态学与地植物学丛刊，1984，8(1)

(1) 竞争系数 a_{ij} 模型：

$$a_{ij}=\frac{\sum_{1}^{n}\left(P_{in}P_{jn}\right)}{\sum_{1}^{n}P_{in}^2}$$

式中，P_{in} 和 P_{jn} 分别为种 i 和种 j 在 n 个群落中的相对优势度。

(2) Lotka-Volterra 竞争方程：

$$\frac{dN_i}{dt}=r_iN_i\left(\frac{K_i-N_i-\sum_{i\neq j}^{n}a_{ij}N_j}{K_i}\right)$$

式中，n 为种数；r_i 为种 i 的内禀增长力；N_i 为种 i 的相对优势度；K_i 为种 i 的容纳量；a_{ij} 为竞争系数。

藏系绵羊种群结构及其最优出栏方案模型

董全，皮南林，许新宜等：海北藏系绵羊种群结构及其出栏方案最优化的探讨．生态学报，1984，4(2)

(1) 藏羊种群的性别年龄结构状态模型：

$$N_{t+1}=AN_t-BU_t$$

式中，N_t 为整个羊群状态；A 为状态转移矩阵；AN_t 反映了羊群本身自然发展变化的情况；BU_t 为人为控制量。

(2) 计算最优藏羊种群结构及其出栏方案的模型：

$$M_{ax}Z=\sum c_iU_i+\sum d_iN_i$$

式中，c_i 和 d_i 分别为第 i 组羊只的出栏收益的系数和存栏羊只带来的收益的系数。

两个物种混合种植时的竞争模型

Firbank L G, Watkinson A R：两个物种混合种植时的竞争分析．The Journal of Applied Ecology, 1985, 22

(1) 如果我们一开始就考虑到在单一栽培中植物对密度的反应，那么每种植物的平均产量 w 为：

$$w=w_m(1+aN)^{-b}$$

式中，w_m 是单作植物的平均产量；N 是收割时的植物密度；参数 a 表示一种植物为获得产量 w_m 而需要的面积；b 表示种群的资源利用率。

收割后存活的植物数量 N 为：

$$N=N_i(1+mN_i)^{-1}$$

式中，N_i 是初始密度；m^{-1} 是自然稀疏后的最大可能密度。

(2) 在两个物种 A 和 B 的混合种植中，每棵植物 A 的平均产量为：

$$w_A=w_{mA}\left[1+a_A(N_A+\alpha N_B)^{-b}\right]$$

式中，α 是竞争系数。

第二物种对第一物种死亡率的影响为：

$$N_A=N_{iA}\left[1+m_A(N_{iA}+\gamma N_{iB})\right]^{-1}$$

式中，γ 是第二竞争系数。

(3) 有第二个物种竞争导致的产量损失概率 l 为：

$$l=\frac{\alpha N_B}{N_A+\alpha N_B}$$

种群增长的 Logistic 方程

许永明：鱼类种群增长的初步研究．生态学杂志，1985，2

$$\frac{dN}{dt}=rN\left[(K-N)/K\right]$$

式中，r 为种群内禀增长率；N 为种群大小；K 为环境容纳力；$\frac{dN}{dt}$ 为瞬时变化率

密度与拥挤度制约死亡率模型

徐汝梅："密度制约死亡率"和或"拥挤度制约死亡率" 生态学报，1985，5(3)

(1) 种群密度 M 模型：

$$M=\sum X_j/Q$$

式中，X_j 为第 j 样本单位或样方中的个体数；Q 为样本中样本单位或样方的总数

(2) 拥挤度模型：

$$\overset{*}{M}=\frac{\sum X_j(X_j-1)}{\sum X_j}$$

(3) 死亡率 $\left(\frac{N-S}{N}\times 100\%\right)$ 模型：

$$\frac{N-S}{N}\times 100\%=a+b\overset{*}{M}$$

式中，a、b 为回归系数

P-Ⅲ分布的概率密度函数

武伟锐，常致和，Dagnelie P，Deltour J：用 Peason Ⅲ型曲线拟合某树种群空间分布型的初步研究 生态学报，1985，5(4)

$$f(x)=\frac{\beta^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)}(x-b)^{\alpha-1}\exp[-\beta(x-b)] \quad (b\leqslant x\leqslant\infty)$$

式中，$b=Ex\left(1-\frac{2Cv}{Ds}\right)$；$a=\frac{4}{Cs^2}$；$\beta=\frac{2}{Ex\cdot Cv\cdot Cs}$

多重时间延迟的种群增长模型

Paton G：包括多重时间延迟的种群增长系统的矩阵模型方法 Ecological Modelling，1986，34

$$\boldsymbol{n}(i+1)=L_1\boldsymbol{n}(i)+L_2\boldsymbol{n}(i-1)+\cdots+L_q\boldsymbol{n}(i-q+1)$$

式中，向量 $\boldsymbol{n}(i)$ 描述了在时段 i 中每一个截然不同的阶段的个体数量；矩阵 L_j $(j=1,\cdots,q)$ 定义了整个种群在 $i+1$ 时段对 $i,i-1,\cdots,i-q+1$ 时段的生物依赖性

平均数的非线性动力学模型

Logofet D O，Svirezhev Y M：生态模型中的平均和聚集——一种非线性方法的尝试 Ecological Modelling，1986，34

令 N_1 和 N_2 是物种 1 和 2 的生物量，则它们的动力学方程为：

$$\frac{dN_i}{dt}=\frac{r_iN_i}{K_i}(K_i-\sum_j\alpha_{ij}N_j) \quad (i,j=1,2)$$

式中，K_i 是物种 i 的环境承载力；r_i 是马尔萨斯比率；α_{ij} 是物种 i 和 j 之间的竞争的系数（物种 j 对物种 i 的影响系数）

集合生物量被定义为：

$$Y(t)=\beta_1N_1(t)+\beta_2N_2(t)$$

$$\frac{dY}{dt}=\frac{r_aY}{K_a}(K_a-Y)$$

式中，r_a 是假物种的平均马尔萨斯比率；K_a 是环境的平均承载力；β_i 是模型参数

对于 $\alpha_{ij}=\alpha \quad (i,j=1,2)$

案例 1. 令 $\alpha\ll 1$ 且 $r_1>r_2$，则：

$$K_a\approx(K_1+K_2)(1-\alpha)$$

$$r_a\approx r_1-\alpha\frac{K_2}{K_1}r_1$$

$$\beta_1\approx\frac{K_1+K_2}{K_1}\left[1-\alpha\left(1+\frac{r_2}{r_1-r_2}\frac{K_2}{K_1}\right)\right],$$

$$\beta_2\approx\alpha\frac{r_1}{r_1-r_2}\frac{K_1+K_2}{K_1}$$

案例 2.令 $\alpha\backsim 1$（虽然 $\alpha<1$），则：

$$K_1=K_2=K$$

$$K_a=2K(1-\alpha)$$

$$r_a=\frac{1}{2(1+\alpha)}\left[r_1+r_2+\sqrt{(r_1+r_2)^2-2r_1r_2(1-\alpha^2)}\right]$$

$$\beta_1=1+(1-\alpha)R(\alpha)$$

$$\beta_2=1-(1-\alpha)R(\alpha)$$

式中，$R(\alpha)=\frac{r_1-r_2}{\alpha(r_1+r_2)+\sqrt{(r_1+r_2)^2-2r_1r_2(1-\alpha^2)}}$。

枯叶年腐解率指数衰减模型

胡肆慧，陈灵芝，孔繁志等：两种中国特有树种的枯叶分解速率，植物生态学与地植物学学报，1986，10(1)

$$\frac{X}{X_0}=e^{-kt}$$

式中，X_0 为枯叶的初始重量；X 为时间 t 时的枯叶剩余重量；K 为枯叶年腐解率。

确定动态经济阈值的数学模型

李典谟，王景明：确定动态经济阈值的微计算机模型．生态学报，1986，6(1)

（1）温度模型：

$$T_D(t) = T_M(t) + \sigma x$$

$$T_M(t) = K_1 + K_2 \sin\left(\frac{\pi}{180}t\right)$$

式中，$T_D(t)$ 为 t 天的模拟的实际温度；$T_M(t)$ 为 t 天的平均温度；x 为一个标准正态分布的随机变量，具有标准差 1 和平均数 0；K_1，K_2 和 σ 为三个参数。

（2）种群动态模型：

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = -\frac{N_i(t)}{M_i(t)} + S_{i-1}\frac{N_{i-1}(t)}{M_{i-1}(t)}$$

式中，N 为种群密度；M_i 为昆虫完成某一特定阶段 i 的发育所需要的时间；S_{i-1} 为阶段 $i-1$ 的存活率。

种群动态模拟模型

苏祥瑶，林昌善：粘虫种群动态模拟的研究．生态学报，1986，6(1)

第 i 阶段的模型：

$$X_{i+1,1}(k+1) = SP_i(k)SN_i(k)G_i(k)X_{i,N_i}(k) \quad (M_i(k)=0)$$

$$X_{i+1,j}(k+1) = SP_i(k)SN_i(k)\{[1-G_i(k)]X_{i,N_i-M_i(k)+j}(k) + G_i(k)X_{i,N_i-M_i(k)+j-1}(k)\} \quad (1 \leqslant j \leqslant M_i(k))$$

$$X_{i,j}(k+1) = SP_i(k)[1-G_i(k)]X_{i,1}(k) + SP_{i-1}(k)SN_{i-1}(k)G_{i-1}(k)X_{i-1,N_{i-1}}(k) \quad (j = M_i(k)+1)$$

$$X_{i,j}(k+1) = SP_i(k)\{[1-G_i(k)]X_{i,j-M_i(k)}(k) + G_i(k)X_{i,j-M_i(k)-1}(k)\} \quad M_i(k)+2 \leqslant j \leqslant N_i$$

式中，N_i 为 i 阶段的年龄级数；$M_i(k) = \text{int}[N_i \cdot R_i(k)]$，int 为取整符号，$R_i(k)$ 为第 k 天 i 阶段的个体的发育速率，则 $M_i(k)$ 为相应的个体向前推进的年龄级的整数部分；$G_i(k) = N_i \cdot R_i(k) - M_i(k)$ 为相应的小数部分；$SN_i(k)$ 为第 k 天从 i 阶段进入 $i+1$ 阶段的个体的自然存活率；$SP_i(k)$ 为第 k 天 i 阶段的个体在天敌作用后的存活率；$X_{i,j}(k)$ 为第 k 天 i 阶段第 j 个年龄级的个体数。

有限空间中的种群生长模型

王莽莽，李典谟：用麦夸方法最优拟合逻辑斯谛曲线．生态学报，1986，6(2)

$$\frac{dN}{dt} = rN\frac{K-N}{K}$$

方程的积分形式：

$$N = \frac{K}{1+e^{a-rt}}$$

式中，K 为环境容纳量；N 为 t 时刻的种群数量；r 为种群内禀增长率；a 为积分常数。

逻辑斯蒂方程

宋波，玄玉仁，卢凤勇等：浅评逻辑斯蒂方程．生态学杂志，1986，5(3)

$$\frac{dX}{dt} = \mu_L X\left(1-\frac{X}{X_m}\right)$$

式中，X 为种群密度；X_m 为密度最大值。

种群密度及生物量动态模型

董鸣：缙云山马尾松种群动态初步研究．植物生态学与地植物学学报，1986，10(4)

（1）种群密度动态模型：

$$\hat{D} = \begin{cases} 19910.500A^{0.1710} & (0 < A < 7) \\ 1\,689\,595.991A^{-2.1658} & (A > 7) \end{cases}$$

式中，$\hat{D}$ 为马尾松种群密度；A 为种群年龄。

（2）种群生物量 $\hat{B}_p$ 动态模型：

$$\hat{B}_p = \frac{40}{1+89.837e^{-0.285A}}$$

林冠毛虫种群仿真模型

Rejmánek M, Smith J D, Goyer R A：水生紫树林（水生紫树属）中的林冠毛虫（鳞甲亚纲，Disstria）的种群动力学仿真模型．Ecological Modelling, 1987, 39

（1）落叶过程和幼虫种群：

描述被幼虫种群毁坏的树叶生长的微分方程 $L(t)$：

$$\frac{dL(t)}{dt} = \frac{L(t)}{M(t)}\frac{dM(t)}{dt} - k_1 C(t)$$

式中，$M(t)$ 是没有被毛虫啃食时树叶的面积；$C(t)$ 是

在时间 t 时树叶的被啃食率；k_1 是表示落下的和被啃食的树叶面积的常数

Logistic 的树叶潜在生长率 $M(t)$ 的计算：

$$\frac{dM(t)}{dt} = r_1 M(t)[1 - M(t)/k_2]$$

式中，r_1 是树叶的相对生长率；k_2 是最大可能叶面积。

$$C(t) = \mathrm{AIC}(t) \cdot N(t)$$

式中，AIC(t)是平均实际个体啃食率；$N(t)$ 是每 hm^2 幼虫总数。

$$\mathrm{AIC}(t) = \mathrm{PIC}(t)\{1 - \exp[-k_3 L(t)/M(t)]\}$$

式中，PIC(t)是潜在个体啃食率；k_3 是表示搜索效率的常数。

$$\mathrm{PIC}(t) = k_4/\{1 + k_5 \exp[-k_6 W(t)]\}$$

式中，k_4，k_5 和 k_6 是常数；$W(t)$ 是个体幼虫的重量。

(2) 年到年的种群动力学：

$$\mathrm{ADU} = \mathrm{PUP}(1 + a_1 \mathrm{PUP})^{-\beta}$$

式中，ADU 是每 hm^2 成体的数量；PUP 是每 hm^2 蛹的初始数量；a_1 和 β 是经验常数。

相同年龄段植物种群的时空演变模型

Lepš J, Kindlmann P：相同年龄段植物种群的时空模式演变模型. Ecological Modelling, 1987, 39

仿真的地点有一个含有 n 个个体的种群。每个个体都被认为是独立的；第 i 个体通过它的高度(d_i)和它占据的圆形区域的半径来描述($r_i = kd_i$，k 是常数)。这个区域的面积是 $S_i = \pi r_i^2$。每个个体的生长率通过一个 logistic 形式的方程来描述，这个方程增加了相邻个体之间的竞争关系，可表达为：

$$d_i(t+1) = d_i(t)\left[1 + a\left(1 - \frac{d_i(t)}{D}\right)R_{\mathrm{ED}_i}(t)\right]$$

式中，a 是长度增长率；D 是个体的最大可能高度；术语 R_{ED_i} 表示相邻个体之间竞争影响，可表达为

$$R_{\mathrm{ED}_i} = \max\left(0, \frac{QS_i - \sum_{j \neq i} O_{\mathrm{VER}_{ij}} \frac{d_j}{d_i}}{QS_i}\right)$$

，Q 是表示相邻个体对生长率(Q 值越高，影响越弱)的影响强度的参数，$O_{\mathrm{VER}_{ij}}$ 是 i 个体和 j 个体重叠的面积

种群的高生长及生物量季节动态模型

高玉宝：人工和自然羊草种群的高生长及生物量季节动态的研究. 植物生态学与地植物学学报，1987，11(1)

(1) 相关指数 R^2 模型：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y})^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}$$

(2) 种群平均高度 h_A 动态模型：

$$\hat{h}_A = 30.6783 + 22.3121 \sin\left[\frac{\pi}{324}\left(\frac{t}{10} - 4\right)^2\right]$$

植物选择性系数

李相敢：崂山麻栎林种群特征及生物量测定. 植物生态学与地植物学学报，1987，11(1)

$$L_{(i)} = \sum_{j=1}^{n}\left(P_{x_{ij}} - \frac{1}{n}\right)^2$$

式中，$L_{(i)}$ 为某一物种对 i 资源的选择性系数；$P_{x_{ij}}$ 为种 x 在 i 资源轴的 j 资源位的密度分配概率；j 为资源位；n 为资源位的个数。

种群密度对光的选择性模型

蒋有绪：生态系统研究的理论分析参考. 生态学杂志，1987，6(1)

$$G' = \frac{n}{X^2}\sum[X_i(X_i - 1)]$$

式中，X_i 为在第 i 个资源位(即此样方)中的个体数；X 为全部 n 个资源位中的个体数总和；G' 的倒数即为生态位的宽度。

季节性生物种群消长的数学模型

沈信叙：季节性生物种群消长的数学模型探讨. 生态学杂志，1987，6(1)

(1) 受环境约束，有生存季节性的生物种群的消长特性：

种群密度 y 模型：

$$y = \frac{k}{1 + c \cdot e^{-at}}$$

(2) 不考虑瞬时随机干扰的消长模式：

增长率方程：

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = B(y,t) - D(y,t) \\ y = y_0 \quad t = t_0 \\ y = y_m \quad t = t_m \end{cases}$$

式中，$B(y,t)$和$D(y,t)$分别为出生率和死亡率。

崔-Lawson 种群模型

王本楠：崔-Lawson 种群模型的显示解及拟合实例．生态学杂志，1987，6(2)

$$\frac{dx}{dt} = \mu_c x \frac{1 - \frac{x}{x_m}}{1 - \frac{x}{x'_m}}$$

崔-Lawson 单种群模型

崔启武：答疑——关于崔 Lawson 单种群新模型．生态学报，1987，7(2)

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\mu_c X(1 - X/X_m)}{1 - X/X'_m}$$

种群结构及其出栏方案分季最优化模型

董全，皮南林，许新宜等：海北藏系绵羊种群结构及其出栏方案分季最优化的探讨．生态学报，1987，7(2)

(1) 种群季动态模型：

$$N_{t,s+1} = A_s N_{t,a} - B_s U_{t,s} \qquad (s = 1,2)$$
$$N_{t+1,1} = A_s N_{t,s} - B_s U_{t,s} \qquad (s = 3)$$

式中，N,U 均为变量，依次分别为组羊只数量和组出栏数量；A 为组间转移系数；B 为出栏对组羊只数量的影响参数；i 为组号；t 为年份；s 为季代号。

(2) 分季最优化的线性规划模型：

$$\max\ Z = \sum_{s=1}^{3}\sum_{i=1}^{7} C_{is} U_i^s + \sum_{s=1}^{3}\sum_{i=1}^{7} d_{is} N_i^s$$

$$\text{s.t.}\ \sum_{i=1}^{7} g_{is} N_i^s < G_s$$

$$A_3 N_3 - B_3 U_3 = N_1$$

$$A_1 N_1 - B_1 U_1 = N_2$$

$$A_2 N_2 - B_2 U_2 = N_3$$

$$(S = 1,2,3)$$

式中，c 为出栏羊只的收益系数；d 为存栏羊只的收益系数；g 为羊只平均采食量系数；c,d,g 加下标 i 和下标 s 后，都表示某组某季的该项系数。

Morisita 指数

纪燊，林美心：珠江广州河段河蚬种群的若干生态学研究．生态学报，1987，7(2)

$$I = N\left(\frac{\sum_{i=1}^{N} n_i(n_i - 1)}{X(X-1)}\right)$$

式中，N 为总样品数；X 为全部样品种河蚬总数；n_i 为第 i 个样品中河蚬的数量。

四点式平均值法

王振中，林孔勋：逻辑斯谛曲线 K 值的四点式平均值估计法．生态学报，1987，7(3)

$$K = \frac{N_j N_k (N_i + N_l) - N_i N_l (N_j - N_k)}{N_j N_k - N_i N_l}$$

$$(i < j,\ k < l,\ k \neq i)$$

种群增长模型

王伯荪，彭少麟：鼎湖山森林优势种群数量动态．生态学报，1987，7(3)

$$\ln \frac{K - N}{N} = a - rt$$

式中，$K = \frac{2N_1N_2N_3 - N_2^2(N_1 + N_3)}{N_1N_3 - N_2^2}$，$N_1$，$N_2$和$N_3$分别为时间$t_1$，$t_2$和$t_3$的种群数量；$r$，$a$ 为参数。

微分拟合建模——DM(1)模型

倪焱：灰色系统理论在种群增长建模中的应用．生态学杂志，1987，6(5)

$$\left\{\hat{X}^{(0)}(t)\right\} = \left\{\hat{X}^{(1)}(t) - \hat{X}^{(1)}(t-1)\right\}$$

$$(t = 1,2,\cdots,N)$$

式中，$\left\{\hat{X}^{(0)}(t)\right\}$即为 DM(1)模型对 $X^{(0)}(t)$ 的拟合数据列。

资源开发竞争模型

Cale W G, O'Neill R V：资源开发竞争理论模型中聚合和一致性问题．Ecological Modelling. 1988, 40

(1) 认为由两个种群(y_1 和 y_2)组成的一个系统为资源 R 而竞争，假定的种群方程为：

$$\mathrm{d}y_i/\mathrm{d}t = a_i y_i - \alpha_{ij} y_i y_j - B_i y_i^2 \quad (i, j = 1,2\ ;\ i \neq j)$$

(2) 资源动力学为：

$$\mathrm{d}R/\mathrm{d}t = IR - kR^2 - f_1 x_1 R - f_2 x_2 R$$

式中，a_i 是输入参数；α_{ij} 表示资源竞争系数；B_i 是密度依赖性损失参数；I 是 R 的输入参数；k 是损失参数。

两者同时竞争的 De Wit 模型

Larsen L C, Williams W A：使 De Wit 竞争模型适合一般非线性回归过程．Ecological modelling, 1988, 41

$$Y = I_1 \frac{M_1 K_{12} Z_1}{K_{12} Z_1 + Z_2} + I_2 \frac{M_2 K_{21} Z_2}{K_{21} Z_2 + Z_1}$$

式中，Y 是净初级生产；M_1 是物种 1 的单作产量；M_2 是物种 2 的单作产量；K_{12} 是物种 1 对于物种 2 的相对拥挤系数；K_{21} 是物种 2 对于物种 1 的相对拥挤系数；Z_1 是物种 1 初始立地的面积；Z_2 是物种 2 初始立地的面积；如果是物种 1 的产量，$I_1 = 1$，否则为 0；如果是物种 2 的产量，$I_2 = 1$，否则为 0。

种群生长的非线性模型

Vlad MI O：小块栖息地中不同龄级个体构成的种群生长的新非线性模型．Ecological Modelling, 1988, 43

考察一个生活在 M 地块中由不同龄级个体构成的种群。种群的时间演变可以用对应于不同地块的出生率和死亡率函数(λ_i 和 μ_i)来描述，也可以用不同地块之间的迁移率 $f_{ij}\Delta t$ 来描述：

$$\mathrm{d}N_i(a,t) = n_i(a,t)\mathrm{d}a \quad (i = 1,\cdots,M)$$

式中，$\mathrm{d}N_i(a,t)$ 表示时间 t 第 i 地块中年龄在 a 和 $a+\mathrm{d}a$ 之间的个体数量；$n_i(a,t)$ 是第 i 地块中种群密度。

(1) 平衡方程：

死亡-迁移方程：

$$(\partial_t + \partial_a) n_i(a,t) + \mu_i n_i(a,t) + \sum_{j \neq i} f_{ij} n_i(a,t) = \sum_{j \neq i} f_{ji} n_j(a,t)$$

出生方程：

$$n_i(0,t) = \int_0^\infty \lambda_i n_i(a,t)\mathrm{d}a$$

初始条件：

$$n_i(a,t_0) = n_i^0(a)$$

边界条件：

$$n_i(a,t) \to 0 \quad 当 \quad a \to \infty$$

年龄分布：

$$c_i(a,t) = \frac{n_i(a,t)}{\sum_i \int_0^\infty n_i(a,t)\mathrm{d}a}$$

(2) 总种群规模：

$$N(t) = \sum_i \int_0^\infty n_i(a,t)\mathrm{d}a$$

$$(\partial_t + \partial_a) c_i(a,t) + c_i(a,t) \sum_{i'} \int_0^\infty (\lambda_{i'} - \mu_{i'}) c_{i'}(a',t)\mathrm{d}a' + \mu_i c_i(a,t) + \sum_{j \neq i} f_{ij} c_i(a,t) = \sum_{j \neq i} f_{ji} c_j(a,t)$$

$$\partial_t N(t) = N(t) \sum_{i'} \int_0^\infty (\lambda_{i'}^0(a',t) + \mu_{i'}^0(a',t)\mathrm{d}a' - N(t)\delta\mu[t, N(t)c_1(a,t),\cdots,N(t)c_M(a,t)]$$

式中，$\lambda_i = \lambda_i^0(a,t) + \delta\lambda_i$；$\mu_i = \mu_i^0(a,t) + \delta\mu_i$。

单物种模型

Woolhouse M E J：跃迁矩阵种群模型的动力学行为．Ecological Modelling, 1988, 42

$$v(t+1) = p_{12}(v)[1 - v(t)] + [1 - p_{21}(v)]v(t)$$

式中，$v(t)$ 是在时间 t 被占据的地块部分，$0 < v(t) < 1$；$p_{12}(v)$ 是一个未被占据地块的移植概率；$p_{21}(v)$ 是地块内物种灭绝的概率。

平衡条件：

$$v^* = \frac{p_{12}}{p_{12} + p_{21}}$$

竞争模型

Glasser J W：开发替代资源过程中的种间干预(和促进)．Ecological Modelling, 1988, 40

$$\frac{\mathrm{d}N_i}{\mathrm{d}t} = r_i \sum_{j=1}^{T} \frac{n_{ji}}{A_j} \left(A_j - \sum_{k=1}^{S} \alpha_{jk} n_{jk} \right)$$

式中，N_i 是物种 i 的种群个体数；有 T 种替代资源和

S 种潜在竞争；r_i 是物种 i 的固有增长率；n_{ji} 是利用第 j 种资源的第 i 物种的个体数量；A_j 是供给的丰富度或者速率；α_{jk} 是物种 k 的个体的消费数量或者速率。

沼泽生态分类及其分布判别模型

杨永兴：三江平原沼泽的生态分类，地理研究，1988，7(1)

(1) 沼泽生态分类的主成分分析模型：

$$y_1 = 0.33x_1 - 0.24x_2 - 0.35x_3 + 0.56x_4 + 0.19x_5 + 0.37x_6 + 0.21x_7 - 0.30x_8 + 0.31x_9$$

$$y_2 = 0.22x_1 + 0.59x_2 - 0.06x_3 - 0.25x_4 - 0.42x_5 + 0.06x_6 + 0.04x_7 - 0.56x_8 + 0.23x_9$$

$$y_3 = 0.47x_1 + 0.17x_2 - 0.35x_3 + 0.56x_4 + 0.19x_5 + 0.37x_6 + 0.21x_7 - 0.30x_8 + 0.31x_9$$

$$y_4 = -0.36x_1 + 0.28x_2 - 0.33x_3 + 0.29x_4 + 0.33x_5 - 0.49x_6 + 0.11x_7 - 0.35x_8 - 0.30x_9$$

$$y_5 = 0.38x_1 + 0.17x_2 + 0.25x_3 - 0.11x_4 + 0.57x_5 + 0.22x_6 - 0.48x_7 - 0.23x_8 - 0.30x_9$$

式中，y_i 为主成分，i=1，2，…，5；x_j 为分类指标，j=1，2，…，9。

(2) 沼泽生态分布判别数学模型：

$$Z_1 = -398.89 + 18.44x_1 + 12.49x_2 + 0.29x_3 + 50.15x_4 + 0.90x_5 - 0.07x_6 + 0.32x_7 + 55.66x_8$$

$$Z_2 = -415.98 + 16.46x_1 + 19.70x_2 + 0.29x_3 + 52.97x_4 + 0.69x_5 - 0.06x_6 + 0.15x_7 + 57.96x_8$$

$$Z_3 = -532.28 + 5.23x_1 + 16.96x_2 + 0.32x_3 + 37.64x_4 + 0.81x_5 - 0.17x_6 + 6.31x_7 + 82.77x_8$$

$$Z_4 = -5028.58 + 20.31x_1 + 23.61x_2 + 0.41x_3 + 54.52x_4 + 0.99x_5 - 0.05x_6 + 0.20x_7 + 60.78x_8$$

$$Z_5 = -4528.86 + 18.55x_1 + 10.35x_2 + 0.28x_3 + 49.45x_4 + 0.63x_5 - 0.06x_6 + 0.76x_7 + 65.63x_8$$

$$Z_6 = -503.41 + 19.57x_1 + 14.96x_2 + 0.30x_3 + 63.55x_4 + 0.51x_5 - 0.02x_6 + 0.46x_7 + 57.87x_8$$

$$Z_7 = -416.19 + 11.03x_1 + 21.60x_2 + 0.31x_3 + 49.13x_4 + 0.81x_5 - 0.08x_6 + 0.50x_7 + 59.96x_8$$

$$Z_8 = -527.81 + 18.49x_1 + 26.09x_2 + 0.35x_3 + 61.48x_4 + 0.86x_5 - 0.07x_6 + 0.20x_7 + 60.53x_8$$

式中，$Z_{i(沼泽体)}$ 为主成分，i=1，2，…，8。

一般谱波分析模型

伍业钢，韩进轩：阔叶红松林红松种群动态的谱分析，生态学杂志，1988，7(1)

$$\hat{x}_t = a_0 + \sum_{k=1}^{p}\left(a_k \cos\omega_k t + b_k \sin\omega_k t\right)$$

种群生命系统的概率模型

张孝羲，耿济国，顾海南等：稻纵卷叶螟(*Canphalocrocis medinalis*)种群生命系统模型的研究．生态学报，1988，8(1)

$$P_{i+1,j} = S_i\left[1 - M_1\left(\frac{\sigma_i}{D_i}\right)^2\right]$$

$$P_{i,j} = S_i - P_{i+1,j}$$

式中，$P_{i+1,j}$，$P_{i,j}$ 分别为 t 时刻虫态的个体在 $t+\Delta t$ 时刻发育进入第 i+1 虫态和仍保留在 i 虫态的概率；S_i，M_i，σ_i 和 D_i 分别为第 i 虫态的存活率、生理年龄级数、发育积温的方差和有效总积温。

空间格局和一维格局的数学模型

韩铭哲：火烧迹地上红松种群自然更新格局的讨论．生态学报，1988，8(4)

(1) 均匀型(二项分布)——理论分布的概率模型：

$$P(\xi = r) = \frac{n!}{r!(n-r)!}p^r q^{n-r}$$

式中，$r = 0,1,2,\cdots,n$，$p+q=1$，r 为样方中的个体数。

(2) 随机型(Poisson 分布)——理论分布的概率模型：

$$P(\xi = r) = \frac{m^r}{r!}e^{-m}$$

式中，m 为每单位面积上的平均个体数。

(3) 群团型——理论分布的概率模型：

负二项分布：

$$P(\xi = r) = C_{+kr-1}^{r}p^r q^{-k-r}$$

式中，$r = 0,1,2,\cdots$；k=const；p、$q > 0$ 且 $q = 1 + p$。

奈曼分布：

$$P(\xi = r) = \frac{e^{-\lambda_1}\cdot\lambda_2^{\lambda}}{r!}\sum_{k=0}^{\infty}\left[\frac{(\lambda_1 e^{-\lambda_2})^j}{j!}\cdot j^r\right]$$

式中，$r=0,1,2,\cdots$；λ_1 为单位平均的群团数；λ_2 为群团内部每单位平均的个体数。

(4) 负二项分布的期望(m)和方差(v)模型：

1) 负二项分布的期望(m)模型：

$$m=\left.\frac{\mathrm{d}M(\theta)}{\mathrm{d}\theta}\right|_{\theta=0}=pk$$

式中，$M(\theta)=(q-pe^{\theta})^{-k}$，为负二项分布的矩母函数。

2) 负二项分布的方差(v)模型：

$$v=\left[\left.\frac{\mathrm{d}^2M(\theta)}{\mathrm{d}\theta^2}\right|_{\theta=0}\right]-m^2=m+\frac{m^2}{k}$$

由此可以看出：$\lim\limits_{k\to\infty}v=\lim\limits_{k\to\infty}\left(m+\frac{m^2}{k}\right)=m$

泡桐对小麦的生长发育和土壤水盐含量影响的统计分析模型

庚立新，张纪林，倪竟德等：泡桐对小麦的生长发育和土壤水盐含量的影响动态. 生态学杂志，1989，8(1)

(1) 相关矩阵 R_{ij} 模型：

$$R_{ij}=\frac{\sum\limits_{K=1}^{N}X_{R'_j}X_{R'_i}}{N}\qquad(i,j=1,2,\cdots,p)$$

(2) 灰色动态模型：

$$X^{(1)}_{(t+1)}=be^{-at}+c$$

式中，t 为时间；a，b 为参数。

蚕豆蚜种群动态与蚕豆生理变化的关系模型

王海波，周纪纶：蚕豆蚜种群动态与蚕豆生理变化的关系. 生态学报，1989，9(1)

(1) 蚕豆生理应激对蚕豆蚜生命周期的影响：

1) 种群的净生殖率(R_0)模型：

$$R_0=\int_0^{\infty}l(x)m(x)\mathrm{d}(x)=\sum l(x)m(x)$$

2) 种群的内禀增长率(r_m)计算模型：

$$\int_0^{\infty}e^{-r_mx}\cdot l(x)m(x)\mathrm{d}(x)=1$$

(2) 种间关系动态模拟和分析：

蚜虫种群动态模型：

$$n_{ij}^{(t+1)}=\begin{cases}P(D)\sum\limits_{j=1}^{k}n_{5,j}^{(t)} & (一龄第一天(i=1,j=1))\\ \sum\limits_{j=1}^{k}n_{i-1,j}^{(t)}\cdot f_{i-1,j}^{(t)} & (i=2,3,4,5,\ j=1)\\ n_{i,j-1}^{(t)}\cdot s_{i,j-1}^{(t)} & (i=1,2,3,4,5,\ j=2,\cdots,k)\\ y(D')\sum\limits_{j=1}^{k}n_{4,j}^{(t)}\cdot f_{4,j}^{(t)} & (i=5,\ j=1,\cdots,k)\end{cases}$$

式中，$n_{i,j}^{(t)}$ 为第 t 次计算中，处于第 i 龄第 j 天年龄的虫数；$s_{i,j}^{(t)}$ 为第 t 次计算中，处于第 i 龄第 j 天年龄的蚜虫在第 $j+1$ 天年龄存活，并仍处于第 i 虫态的比例；$f_{i,j}^{(t)}$ 为第 t 次计算中，处于第 i 龄虫态的蚜虫在 j 天年龄完成本阶段发育，并在第 $j+1$ 天进入第 $i+1$ 龄虫态的比例；$P(D)$ 为生殖率；$y(D')$ 为有翅率。

种群变动和生产量测算模型

黄祥飞：武汉东湖短尾秀体溞的种群变动和生产量. 生态学报，1989，9(2)

(1) 生物量的测算：

体长-体重回归方程：

$$\lg W=2.0411\lg L+0.6462$$

式中，W 为体重；L 为体长。

(2) 不同发育阶段发育时间的测定：

D-T 回归方程：

$$\lg D=2.0195-1.3784\lg T$$

式中，D 为时间(d)；T 为温度(℃)。

(3) 生产量的计算：

1) 某日生产量的计算模型：

$$P=\frac{N_e\cdot\Delta W_e}{T_e}+\frac{N_1\Delta W_1}{T_1}+\frac{N_2\Delta W_2}{T_2}+\frac{N_3\Delta W_3}{T_3}+\frac{N_4\Delta W_4}{T_4}$$

式中，N_e，ΔW_e 和 T_e 分别为卵的个体数、增重及发育时间；T_i，ΔW_i 和 N_i 分别为个体长组的发育时间、增重及个体数。

2) 累计生产量的计算模型：

$$P_T=\sum_{i=1}^{n-1}\frac{P_i+P_{i+1}}{2}(t_{i+1}-t_i)$$

式中，P_i 为不同日期的生产量；t_i 为采样间隔。

种群内禀增长力及捕食功能反应模型

蒉启陆：纽氏钝绥螨、尼氏钝绥螨及其猎物——桔全爪螨生态学特性的比较研究．生态学报，1989，9(2)

1. 不同温度下三种螨的种群内禀增长力

(1) 平均历期模型：

$$T = xL_x M_x / R_0$$

式中，L_x 为同一天产出的卵发育到 x 年龄时的存活率；M_x 为到 x 年龄时存活的雌成螨在该年龄的平均产卵数乘以雌性比率的积；R_0 为净繁殖率。

(2) 内禀增长率模型：

$$r_m = \ln R_0 / T$$

(3) 周限增长率模型：

$$\lambda = e^{r_m}$$

(4) 计算 r_m 精确值的 Birch 方程：

$$e^{7-r_m x} L_x M_x = 1097$$

2. 两种捕食螨对桔全爪螨的功能反应

(1) 圆盘方程：

$$N_a = aNT/(1 + aT_H N)$$

(2) 随机捕食者方程：

$$N_a = N\left[1 - e^{-a'(PT - T_H N_a)}\right]$$

式中，N_a 为捕获猎物数；N 为猎物密度；T 为实验时间；P 为捕食者数；a' 为单位时间攻击率；T_H 为处理时间。

种群空间分布型及其混合种群抽样模型

江国强，罗肖南：腹管食螨瓢虫、桔全爪螨种群空间分布型及其混合种群抽样技术的研究．生态学报，1989，9(3)

(1) 分析方法：

1) Iwao 抽样数模型：

$$n = \frac{1}{D^2}\left(\frac{\alpha + 1}{m} + \beta - 1\right)$$

2) P. D. Mowery 抽样数模型：

$$M = \frac{K_c D^2 m}{K_c + m} N - \frac{K_c a m^{-b}}{m(K_c + m)}$$

式中，α，β 是 $\overset{*}{m}$-m 线性回归方程中的参数；a，b 为 Taylor 指数公式 $S^2 = a\overline{X^b}$ 中的参数；K_c 为共通 K 值，按 $K_c = \sum X' / \sum Y'$ 计算；D 为允许误差；m 为种群平均密度。

(2) 腹管食螨瓢虫、桔全爪螨混合种群抽样技术：

1) 腹管食螨瓢虫种群抽样技术——种群田间调查的理论抽样数模型：

$$n = 1/D^2 (1.564/m + 0.763)$$

2) 桔全爪螨种群抽样技术——种群田间调查二阶抽样法的理论抽样样数(N-M)配额方程：

$$1/M = \frac{0.436mD^2}{0.436 + m} N - \frac{0.588m^{1.576}}{m(0.436 + m)}$$

式中，N 为桔全爪螨田间调查理论抽样样数；M 为每树抽取的叶片数。

东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度模型

徐兆礼，陈亚瞿：东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲐鲹渔场的关系．生态学杂志，1989，8(4)

(1) 优势度 Y 模型：

$$Y = \frac{n_i}{N} f_i$$

式中，n_i 为第 i 个种出现的个体数；f_i 为第 i 个种在各个站位出现的频率；N 为出现的总个体数。

(2) 丛生指标 I 模型：

$$I = \frac{S^2}{X} - 1$$

(3) 聚块性指标 $\frac{\overline{X}^*}{\overline{X}}$ 模型：

$$\frac{\overline{X}^*}{\overline{X}} = \frac{S^2 - \overline{X} + \overline{X}^2}{\overline{X}^2}$$

(4) 扩散指标 I_δ 模型：

$$I_\delta = \frac{S^2 - \overline{X} + \overline{X}^2}{\overline{X}^2} \cdot \frac{N}{N - 1}$$

(5) 负二项分布参数的倒数 C_A 模型：

$$C_A = \frac{S^2 - \overline{X}}{\overline{X}^2}$$

(6) 平均拥挤度 $\overline{X}^*$ 模型：

$$\overline{X}^* = \frac{S^2 - \overline{X} + \overline{X}^2}{\overline{X}^2}$$

式中，$\overline{X}$ 为每个种在各站位分布的平均值；S^2 为方差；N 为该优势种的个体总数。

菲律宾蛤仔的种群动态模型

李明云，薛学朗，冯坚等：象山港黄墩支港菲律宾蛤仔的种群动态及其繁殖保护措施的探讨 生态学报，1989，9(4)

(1) 壳长生长模型：

$$L_t = \frac{L_\infty}{1+e^{-k(t_m-t_0)}} = \frac{4.06}{1+e^{2.1791-0.0861t_m}}$$

式中，$L_\infty = 4.06$，为 L_t 的最大值；k=0.0861，为曲率；$t_0 = 25.3086$，为理论起始月龄；t_m 为 m 个月龄。

(2) 生长速度模型：

$$\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}t} = \frac{3.0896e^{-0.0861t_m}}{(1+e^{2.1791-0.0861t_m})^2}$$

岛屿生物种群模型

郝建国：岛屿生物地理学理论：模型与应用 生态学杂志，1989，8(6)

(1) 种-面积关系模型：

$$S = cA^z$$

式中，S 为种丰富度；A 为面积；c,z 为正常数。

(2) MucArthur-Wilson 模型：

$$\frac{\mathrm{d}S(t)}{\mathrm{d}t} = I - E$$

式中，I 为迁入率；E 为绝灭率。

优势种生物量及第一性生产力模型

彭少麟，张祝平：鼎湖山森林植被主要优势种黄果厚壳桂、厚壳桂生物量级第一性生产研究 植物生态学与地植物学学报，1990，14(1)

(1) 光合和呼吸速率模型：

$$F_n = \frac{\Delta C \cdot V}{A \cdot 10^3} \times \frac{44}{22.4} \times \frac{273}{273+T} \times \frac{P}{760}$$

$$R = \frac{\Delta C \cdot V}{gWD \cdot 10^3} \times \frac{44}{22.4} \times \frac{273}{273+T} \times \frac{P}{760}$$

式中，F_n 为净光合作用速率；R 为呼吸作用速率；ΔC 为叶室或呼吸装置内外气体 CO_2 的浓度差；V 为开放式叶室或呼吸装置内的气体流量，或封闭式叶室和管道的容积；A 为叶面积；gWD 为呼吸器官的干重；44 为克分子 CO_2 重量；22.4 为标准状况下克分子气体的体积；T 为叶室或呼吸装置内的温度；P 为大气压 (mmHg)。

(2) 净第一性生产力 NPP 模型：

$$NPP = P_g - R_g' - R_g$$

$$P_g = 0.67 \cdot F_n \cdot T \cdot S$$

$$R_g' = 0.67 \cdot R \cdot T \cdot S$$

$$R_g = 0.67 \cdot R \cdot T \cdot W$$

式中，P_g 为总光合量；R_g' 为叶子的呼吸量；P_g 为其他器官的呼吸量；T 为总光合时间；S 为叶面积；W 为呼吸器官干重；0.67 为克 CO_2 换算为克干重的转换系数。

种群的空间动态分析模型

赵惠燕，汪世泽，董应才：麦蚜自然种群的空间动态 生态学杂志，1990，9(4)

(1) 平均拥挤度 $\overset{*}{m}$ 模型：

$$\overset{*}{m} = \sum[x_i(x_i-1)] / \sum x_i$$

(2) 谐波分析模型：

$$y_t = C_0 + \sum_{\lambda=1}^{k} C_\lambda \sin(\lambda\omega t + \phi_\lambda)$$

式中，C_0 为周期变化的平均；$C_1,\cdots,C_k$ 为各谐波的振幅，它标志着各该周期所起作用的大小；$\phi_1,\cdots,\phi_k$ 为各谐波的相角。

种群动态模型

张文军，汪世泽：棉蚜种群数量模拟模型的初步研究 生态杂志，1990，9(5)

$$N(t) = \frac{S\beta}{\gamma}(t-\alpha)^{\beta-1} \cdot \exp\left[-\frac{(t-\alpha)^\beta}{\gamma}\right]$$

式中，S 为总为害量；α 为害虫初发日；β 为种群发生的类型参数；γ 为种群增长速率相对参数。

动物种群密度模型

江海声：灵长类生态学研究方法 生态学杂志，1990，9(6)

$$P_x = 1 - \left(\frac{x}{w}\right)^k$$

式中，P_x 为在距离 x 时看到动物的概率；w 为能看到

动物的最大距离；k 为曲线系数。

种群生长的复合生长类型

Sun P, Lin C：种群生长的复合生长类型. Ecological Modelling, 1991, 55

$$N = f(t;t_0,t_1,a,b,r,K) = \begin{cases} \exp(a+rt) & (t \leqslant t_0) \\ h(t) & (t_0 < t < t_1) \\ K/[1+\exp(b-rt)] & (t > t_1) \end{cases}$$

式中，N 是种群；r 是固有的生长率；K 是环境容量；t 是时间；a 和 b 是常数；$h(t)$ 是一条曲线，它表示种群密度从曲线 $N=\exp(a+rt)$ 变成曲线 $N=K/[1+\exp(b-rt)]$ 的变化过程。

种间竞争模型

Guowei S, Cui Qiwu, Bo S：一个新的种间竞争的数学模型——对经典 Lotka - Volterra 竞争方程的扩展, Ecological Modelling, 1991, 58

(1) 营养动力学：

$$\frac{dX_i}{X_i dt} = \frac{\mu_{mi} C}{k_i + C}$$

式中，C 是有限营养的浓度；μ_{mi} 是当营养无限时，种群 i 的最大种生长速率；k_i 是种群 i 的营养利用效率。

如果有限营养的初始浓度是 S_m，系统中有两个不同的种群，一段时间之后，在时间 t 有限营养浓度减小到 C，而竞争种群 i 的规模为 X_i，它包含有限营养浓度 S_i，令 α_i 表示种群 i 中每个个体包含的有限营养数量，则有：

$$C = S_m - (S_1 + S_2)$$

$$S_1 = \alpha_1 X_1, \quad S_2 = \alpha_2 X_2$$

$$S_m = \alpha_1 X_{m1} = \alpha_2 X_{m2}$$

式中，X_{mi} 是当所有的有限营养被转换成种群 i 的生物量之后，种群 i 的最大规模。

(2) 表示有相同营养需求的两个竞争种群的纯出生过程的新种间竞争模型如下：

$$\frac{dX_1}{dt} = \mu_{c1} X_1 \cdot \frac{1-(X_1+\alpha_2/\alpha_1 X_2)X_{m1}}{1-(X_1+\alpha_2/\alpha_1 X_2)/X'_{m1}}$$

$$\frac{dX_2}{dt} = \mu_{c2} X_2 \cdot \frac{1-(X_2+\alpha_1/\alpha_2 X_1)X_{m2}}{1-(X_2+\alpha_1/\alpha_2 X_1)/X'_{m2}}$$

式中，$X'_{mi} = k_i/\alpha_i + X_{mi}$ 是一个与可用营养数量和种群 i 的营养利用效率有关的新的参数；$\mu_{ci} = (X_{mi}/X'_{mi}) \cdot \mu_{mi}$ 是种群 i 的种生长速率的参数；α_2/α_1 和 α_1/α_2 是竞争系数。

麦蚜种间竞争模型

玛效文：麦蚜种间竞争研究初报. 生态学杂志，1991，10(1)

(1) 麦蚜两个种间的竞争模型：

$$\frac{dN_1}{dt} = r_1 N_1 \frac{k_1 - N_1 - \alpha N_2}{k_1}$$

$$\frac{dN_2}{dt} = r_2 N_2 \frac{k_2 - N_2 - \beta N_1}{k_2}$$

(2) 混合种群中麦蚜的竞争模型：

$$\frac{dN_i}{dt} = r_i N_i \frac{k_i - N_i - \sum_j \alpha_{ij} N_j - \sum_{j,k} \beta_{ijk} N_j N_k}{k_i} \quad (i \neq j \neq k)$$

(3) 麦蚜混合种群的生态位：

1) 生态位重叠 L_{ij} 模型：

$$L_{ij} = n \sum_{k=1}^{n} P_{ik} P_{jk}$$

式中，n 为资源单元数；P_{ik}、P_{jk} 为第 i 种和第 j 种的个体在第 k 个资源上的分布比例。

2) 生态位宽度 B_i 模型：

$$B_i = \frac{1}{n \sum_{k=1}^{n} {P_{ik}}^2}$$

生态位重叠模型

李宏实：吉林省西部草原蝗虫群落的集团结构. 生态学报，1991，11(1)

$$O_{jk} = O_{kj} = \frac{\sum_i P_{ij} \sum_i P_{ik}}{\sqrt{\sum_i {P_{ij}}^2 \sum_i {P_{ik}}^2}}$$

式中，O_{jk} 为种 j 和种 k 的生态位重叠值；P_{ij},P_{ik} 分别为种 j 和种 k 在资源 i 中所占百分比。

天敌之间"误杀作用"的种群数学模型

王会福：关于天敌—害虫系统中天敌之间"误杀作用"的一种数学模型. 生态学报，1991，11(1)

(1) 种群数学模型：

$$\begin{cases} N_{t+1} = f_0(N_t)N_t[1 - f_1(P_t) - f_2(Q_t) + f_1'(Q_t)] \\ P_{t+1} = C_1 N_t [f_1(P_t) - f_1'(Q_t)] \\ Q_{t+1} = C_2 N_t f_2(Q_t) \end{cases}$$

式中，N_t、N_{t+1}、P_t、P_{t+1}、Q_t 和 Q_{t+1} 分别为害虫、寄生性天敌和捕食性天敌相继世代的数量；$f_0(N_t)$ 为害虫个体的增长率；$f_1(P_t)$ 为害虫 N 被寄生性天敌 P 寄生的概率；$f_2(Q_t)$ 为害虫 N 被捕食性天敌 Q 捕食的概率；$f_1'(Q_t)$ 为寄主 N 已被寄生性天敌 P 寄生后又被捕食性天敌 Q 捕食的概率；C_1,C_2 分别为寄生性天敌 P 和捕食性天敌 Q 在其他因子作用下的存活率，均为小于 1 的常数。

(2) "误杀作用"下的种群数学模型：

$$\begin{cases} N_{t+1} = f_0(N_t)N_t[1 - f_1(N_t, P_{1,t}, P_{2,t}) - \\ \quad f_2(N_t, P_{2,t}, P_{1,t}) - f_3(N_t, Q_t) + \\ \quad f_1'(P_{1,t}, Q_t) + f_2'(P_{2,t}, Q_t) + \\ \quad f_1(N_t, P_{1,t}, P_{2,t}) f_2(N_t, P_{2,t}, P_{1,t})] \\ P_{1,t+1} = C_1 N_t [f_1(N_t, P_{1,t}, P_{2,t}) - \\ \quad \frac{b}{a+b} f_1(N_t, P_{1,t}, P_{2,t}) \times \\ \quad f_2(N_t, P_{2,t}, P_{1,t}) - \\ \quad f_1'(P_{1,t}, Q_t)] \\ P_{2,t+1} = C_2 N_t [f_2(N_t, P_{2,t}, P_{1,t}) - \\ \quad \frac{b}{a+b} f_1(N_t, P_{1,t}, P_{2,t}) \times \\ \quad f_2(N_t, P_{2,t}, P_{1,t}) - \\ \quad f_2'(P_{2,t}, Q_t)] \\ Q_{t+1} = C_3 N_t f_3(Q_t) \end{cases}$$

式中，$f_1(N_t, P_{1,t}, P_{2,t})$ 为害虫 N 被寄生性天敌 P_1 寄生的概率；$f_2(N_t, P_{2,t}, P_{1,t})$ 为害虫 N 被寄生性天敌 P_2 寄生的概率；$f_3(N_t, Q_t)$ 为捕食性天敌 Q 杀死害虫的概率；$f_1'(P_{1,t}, Q_t)$，$f_2'(P_{2,t}, Q_t)$ 分别为害虫体内的寄生性天敌 P_1 和 P_2 被捕食性天敌杀死的概率；a:b 为 P_1 和 P_2 在多寄生中通过它们的寄主中的竞争，决定出两者的成活比例。

复杂系统的种群动态模型

刘来福：生态学数学模型的研究进展. 生态学杂志，1991，10(2)

$$\begin{cases} P(t+1) = N(t)(1-f) \\ N(t+1) = L(N(t)f - Q(t)f) \\ Q(t+1) = B\exp\left\{r\left[1 - \frac{Q(t)}{Q^*}\right]\right\} Q(t) f \end{cases}$$

式中，L、B、r、Q^* 为参数；$f = \left[1 + \frac{aP(t)}{K}\right]^{-k}$；$P$、$Q$、$N$ 分别为寄生者、寄主 A 和寄主 B 的中群密度。

种群聚集均数 λ 模型

汪顺祥，郭振中，熊继文：矢尖蚧及其主要天敌空间格局研究. 生态学报，1991，11(2)

$$\lambda = \frac{m}{2k} v$$

式中，k 为负二项分布系数；v 为自由度等于 $2k$ 时的 $x_{0.5}^2$ 分布函数值。

Logistic 方程模型

王启基，周兴民：高寒矮嵩草草甸禾草种群的生长发育节律及环境适应性. 植物生态学与地植物学学报，1991，15(2)

$$H_i = \frac{K_i}{1 + e^{Ai - BiT}}$$

$$(i = 1, 2, \cdots, 7)$$

式中，H 为植株高度；K 为可能到达的最大植株高度；A，B 为回归系数；T 为 ≥10 ℃的积温；i 为禾草种群。

种群调节与竞争模型

赵学农：哀牢山木果石栎林种群调节与竞争的初步研究. 植物生态学与地植物学学报，1991，15(2)

(1) 木果石栎林种群的自我调节：

平均植株生物量 $\overline{B}$ 与密度 D 的关系模型：

$$\overline{B} = CD^{-a}$$

式中，a 为密度和平均植株生物量双对数图中的斜率；C 为与植物本身生长特性有关的常数。

(2) 木果石栎林优势种间的竞争：

Lotka-Volterra 竞争模型：

$$\frac{dN_i}{dt} = r_i N_i \left(1 - \frac{N_i + a_{ij} N_j}{K_i}\right)$$

$$(i, j = 1, 2, \cdots, n (i \neq j))$$

式中，N_i 为种 i 的优势度；i,j 表示 n 个生长在一起的

物种；K_i 为种 i 的环境容纳量；r_i 为种 i 的内禀增长率；a_{ij} 为种 j 对种 i 的竞争系数。

小群优化结构的分析模型

文绍开，叶基铿，张沅：海门林青羊小群优化结构的分析　自然资源，1991，2

(1) 最优群体近交系数和群体有效大小的估测：

1) 群体近交系数 F_{t+1} 模型：

$$F_{t+1} = PF_tP' - D$$

式中，t 为 t 年度；D 为对角线矩阵；F 为近交系数矩阵；P 为基因流动矩阵。

2) 群体有效含量 N_e 模型：

$$\frac{1}{N_e} = \frac{1}{4L}\left[\frac{1}{M_1} + \sum_{i=2}^{h} q_i^2\left(\frac{1}{M_i} - \frac{1}{M_{i-1}}\right)\right] + \frac{1}{4L}\left[\frac{1}{F_1} + \sum_{j=2}^{k} q_{h+j}^2\left(\frac{1}{F_j} - \frac{1}{F_{j-1}}\right)\right]$$

式中，$q_i = q_{1i} + q_{(h+1,i)}$；$i = 1,2,\cdots,h,h+1,\cdots,h+k$；$M$ 为公畜数量；L 为群体世代间隔。

(2) 群体遗传进展的估测：

群体遗传进展 $R(t)$ 模型：

$$R(t) = [tA + (I - B^{t+1})] \times (I - B)^{-1} + (I - Q^{t+1})(I - Q)^{-1}S$$

式中，$R(t)$ 为 t 年的群体遗传进展；A 为出生矩阵；$B=P-A$；I 为单位矩阵；Q 为成熟矩阵；S 为第一代的遗传进展。

初始种群密度和最终种群密度之间的关系模型

Phillips M S, Hackett C A, Trudgill D L：对部分有抵抗力的马铃薯，马铃薯囊线虫 *Globodera pallida* 的初始种群密度和最终种群密度之间的关系　Journal of Applied Ecology, 1991,28

(1) 植物产量 y (没有线虫时的产量)和线虫密度 P_i 之间的关系：

Seinhorst 的模型：

$$y = \begin{cases} m + (1-m)z^{P_i - T} & (P_i > T) \\ 1 & (P_i < T) \end{cases}$$

式中，m 是当所有可用空间都被线虫占据时的最小产量；z 是对于每个增加的线虫引起的最小值之上的产量降低；T 是线虫密度的边界值，小于这个值则损害可以忽略。

Elston，Phillips 和 Trudgill 提出一个反线性模型：

$$y = 1 - \frac{(1-m)P_i}{a + P_i}$$

式中，a 是一个决定增加率的参数；P_i 是预期块茎产量的减少量。

(2) 马铃薯囊线虫的初始种群密度和最终种群密度之间的关系：

模型 A：Jones 和 Kempton 模型

$$P_f = \frac{f'(1-C_p)P_i}{1 + \dfrac{b'(1-C_p)P_i}{z^P}} + C_pP_i$$

式中，$f' = fH$ 且 $b' = bH/h$；P_f 和 P_i 分别是线虫的最终种群密度和初始种群密度；f 是每个雌性个体平均的产卵数量；H 是成功侵入根部的幼年个体的数量；b 是雄性和雌性的比率和根内幼体密度之间的比例常数；h 是根的密度；C_p 是未孵化囊胞的遗留部分。

模型 B：Jones 和 Kempton 模型的一般公式：

$$P_f = \frac{f'(1-C_p)P_i}{1 + \dfrac{b'(1-C_p)P_i}{m + (1-m)z^{P_i}}} + C_pP_i$$

模型 C：Seinhorst 种群模型：

$$P_f = \frac{[m + (1-m)z^{P_i}]a(1 - q^{(1-C_p)P_i})}{-(1-C_p)\ln q} + C_pP_i$$

式中，当密度 $P_i = 1$，$1-q$ 是可用的觅食空间。

模型 D：Jones 和 Kempton 模型与反线性产量—密度模型相结合

$$P_f = \frac{f'(1-C_p)P_i}{1 + b'(1-C_p)P_i(1+kP_i)} + C_pP_i$$

式中，$k = 1/a$。

温度对种群的影响模型

任顺祥，郭振中，熊继文：温度对二双斑唇瓢虫实验种群的影响。生态学报，1991，11(3)

(1) 温度对二双斑唇瓢虫发育的影响：

发育速率模型：

$$V = \frac{K}{1 + e^{-r(T-T_0)}}\left(1 - e^{-\frac{T-T_L}{\delta}}\right)\left(1 - e^{-\frac{T_H-T}{\delta}}\right)$$

式中，K 为高温下潜在的饱和发育速度，等于最适发

育速度的2倍；r为发育速度随温变化的指数增长率；T_L、T_H分别为最低、最高临界温度；T_0为发育温度；δ为边界层宽度，其相对大小反映了昆虫对极端温度的不同忍耐程度。

(2) 温室下二双斑唇瓢虫种群繁殖特征：

1) 种群的增长率模型：

$$\gamma_m = \ln R_0/T$$

式中，$R_0=\sum L_X M_X$，为种群净增殖力；$T=\sum L_X M_X X/R_0$，为雌性子代生出时母体的平均年龄，X为时间间隔，L_X 为任一个体在X期间得以存活的概率，M_X为在X期间平均每雌产雌数，即特定年龄产雌率。

2) 周限增长率模型：

$$\lambda = e^{\gamma_m}$$

逻辑斯谛方程模型

曹广侠，林璋德：云冷杉林建群种的种群优势度增长动态研究。植物生态学与地植物学学报，1991，15(3)

$$\frac{ds}{dt}=r\left(1-\frac{S}{k}\right)S$$

式中，r为内禀增长率；S为林木的基面积；k为一定环境条件下种群基面积的最大容纳量。

种群密度与生物量动态模型

张利权：浙江省松阳县黄山松种群密度与生物量动态。植物生态学与地植物学学报，1991，15(3)

(1) 相对生长关系模型：

$$WT=a(D^2H)^b$$

式中，WT为黄山松个体地上部分干重；a、b为系数；D为个体的胸径或基径；H为个体的株高。

(2) 黄山松种群生物量随时间变化的模型(Logistic曲线)：

$$B_T=\frac{B_K}{1+Ce^{-rA}}$$

式中，B_T为种群生物量，单位为$t\cdot hm^{-2}$；B_K为立地可负载的最大种群生物量，单位同B_T；A为种群年龄，单位为a；C、r为系数。

油松种群自然更新模型

李思文，张连翔，骑国新：油松种群自然更新格局的研究。生态学杂志，1991，10(4)

(1) 频次分布比较法：

1) Neyman-A 型分布的概率$P(\xi=r)$模型：

$$P(\xi=r)=e^{-\lambda_1}\frac{\lambda_2^r}{r!}\cdot\sum_{j=0}^{\infty}\left[\frac{(\lambda_1 e^{-\lambda_2})^j}{j!}\cdot j^r\right]$$

2) 负二项分布概率$P(\xi=r)$模型：

$$P(\xi=r)=\frac{(k+r-1)!}{r!(k-1)!}p^r q^{-k-r}$$

3) 截尾负二项分布概率$P(Y=r)$模型：

$$P(Y=r)=\frac{w^k}{1-w^k}\cdot\frac{(k-r-1)!}{r!(k-1)!}\cdot\eta^r$$

4) Polya-Eggenberger 核心分布概率$P(\xi=r)$模型：

$$P(\xi=r)=\frac{1}{r!}(1+\rho)^{-\frac{\lambda}{\rho}-r}\cdot\prod_{l=0}^{r-1}(\lambda+l\rho)$$

(2) 聚集度指标测定法：

1) 扩散系数C模型：

$$C=\frac{S^2}{\bar{x}}$$

式中，$\bar{x}$为种群平均密度；S^2为方差。

2) Morisita 的扩散指标I_δ模型：

$$I_\delta=\frac{\sum f\cdot\left(\sum fx^2-\sum fx\right)}{\sum fx\cdot\left(\sum fx-1\right)}$$

式中，作为聚集指标的I_δ，其判断标准为：$I_\delta=1$为随机型分布；$I_\delta<1$为均匀型分布；$I_\delta>1$为聚集型分布。

单种群增长的动态模型

王本楠，姚寅：生态模型中混沌与分形结构的屏幕造形。生态学杂志，1991，10(4)

$$x_{s+1}=x_s\left(K_1+\frac{K_2}{1+x_s^n}\right)$$

七星瓢虫分布型的判定模型

蔡晓明，尚玉昌，阎桂云等：大白菜上七星瓢虫空间格局及抽样技术研究。生态学杂志，1991，10(5)

(1) 从种群扩散型指数判定：

1) 扩散指数C模型：

$$C = \frac{S^2}{\bar{x}}$$

2）负二项分布 k 值模型：

$$k = \frac{\bar{x}}{p}$$

$$p = \frac{S^2}{\bar{x}} \quad 1$$

3）Morisita 指数 I_δ 模型：

$$I_\delta = n \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i(x_i - 1)}{N(N-1)}$$

式中，n 为抽样数；N 为总虫数。

(2) 从种群的平均密度和平均拥挤度判定：

1）平均拥挤度 $\overset{*}{m}$ 模型：

$$\overset{*}{m} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i$$

式中，x_i 为每个样方的个体数；N 为总个体数。

2）改进的 Iwao $\overset{*}{m}$-m 模型：

$$\overset{*}{m} = \alpha + \beta' m + \gamma m^2 + \delta m^3$$

式中，α 为基本集合度指数。

种间关联度 χ^2

李育中：三种类型草地植物种间关联的测定与比较．生态学杂志，1991，10(6)

$$\chi^2 = \frac{\left(|ad - bc| - \frac{1}{2}n\right)^2}{(a+b)(c+d)(a+c)(b+d)}$$

式中，a 为存在 A 和 B 物种的单位数；b 为只有 B 物种的单位数；c 为只有 A 物种的单位数；d 为 A 和 B 物种均不存在的单位数；n 为总单位数。

环境变化下的种群模型

Peter B, Mark T：环境变化与小种群的持续．Ecological Aplications，1992，2(1)

(1) 逻辑推理种群增长模型：

$$r(t) = r_i[1 - n(t)/k]$$

式中，$r(t)$ 是增长率；r_i 是内在增长率；$n(t)$ 是 t 年份的种群个体数；k 是承载力。

(2) 一种密度依赖模型——θ-逻辑推理模型：

$$r(t) = r_i[1 - (n/k)^\theta]$$

式中，θ 是参数。

(3) 考虑不确定因素的种群模型：

$$n(t+1) = n(t)e^{r[t,n(t)] - E}$$

式中，$r[t,n(t)]$ 等于已知的增长率，可以通过 θ-逻辑推理得到，也可以通过密度无关模型得到；E 是正态分布的随机误差，平均值为 0，并且变量等于增长率中的环境变量。

种群密度动态模型

梁士楚：贵阳喀斯特山地云贵鹅耳枥种群动态研究．生态学报，1992，12(1)

云贵鹅耳枥种群密度(D)随种群径级度(A)变化的数学模型：

$$D = \begin{cases} 4.6063 \times 10^9 A^{-3.8968} & (p < 0.05，同一演替阶段群落) \\ 3.4136 \times 10^5 A^{-1.4962} & (p < 0.05，不同演替阶段群落) \end{cases}$$

谐波模型

夏乃斌，屠泉洪，张素芬：在上树时间序列过程中，油松毛虫越冬幼虫扩散型变化的趋势分析。生态学报，1992，12(1)

$$y_t = a_0 + \sum_{\lambda=1}^{k}(a_\lambda \cos\lambda\omega t + b_\lambda \sin\lambda\omega t)$$

式中，y_t 为周期；k 为相重叠的谐波数；$a_0 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i$，为周期变化的平均；$a_k = \frac{2}{n}\sum_{i=0}^{n-1} y_i \cos k\omega t_i$；$b_k = \frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n-1} y_i \sin k\omega t_i$。

水稻 leaf-folders 的种群动力学及其与水稻相互作用的仿真模型

Graf B, Lamb R, Heong K et al：水稻 leaf-folders（鳞翅类：螟蛾科）的种群动力学及其与水稻相互作用的仿真模型．Journal of Applied Ecology，1992，29

(1) Leaf-folder 种群动力学：

年龄段 i 的日变化：

$$\frac{dQ_i(t)}{dt} = r_{i-1}(t) - r_i(t) - [\mu_i(t)Q_i(t)]$$

式中，$Q_i(t)$ 表示在时间 t 和年龄段 i 的数量(n)或重量(m)；$r_i(t)$ 是从年龄段 i 到 $i+1$ 的转化率；$\mu_i(t)$ 表示在时间 t 和年龄段 i 的净损耗率。

(2) leaf-folder 和水稻的相互作用：

leaf-folder 幼虫的喂养率($A(t)$)：

$$A(t) = -\frac{d(t)}{s(t)}\ln[e^{-s(t)}(1-e^{-s(t)q(t)/d(t)}) + e^{-s(t)q(t)/d(t)}]$$

式中，$q(t)$ 表示在 t 时间水稻叶片中的有效碳水化合物；$d(t)$ 是 leaf-folder 种群在特定时间对碳水化合物的需求；$s(t)$ 是将 leaf-folder 种群获取这些碳水化合物的能力定量化。

(3) 对水稻的损害：

leaf-folder 引起的叶面积损失：

$$L_B = w\left(1-\frac{1}{\pi}\right)\sum_{i=5}^{20}[n_i A(\lambda_i)]$$

式中，$A(\lambda_i)$ 表示 i 年龄段幼虫引起的叶片折叠的长度；n_i 是 i 年龄段 leaf-folder 幼虫的数量；w 是水稻叶片的平均宽度。

物种群丛的能量定律

Kendal W S：种群地理分布中的分形测量　Ecological Modelling, 1992, 64

$$\sigma^2 = a\mu^b$$

式中，μ 是每单位样方中动物的平均数量；σ^2 是每单位样方中动物数量的变化；a 和 b 是常数。

种群增长的必要条件

Pulliam H R, Dunning J B et al：复合景观中的人口动力学——案例研究　Ecological Applications, 1992, 2(2)

$$P_A > 1.0 - 1.5P_J$$

式中，P_A 和 P_J 分别是成体和幼体的存活率。

食蚜绒螨和棉蚜的聚集差异

董应才，汪世泽：食蚜绒螨和棉蚜的分布关系研究　生态学报, 1992, 12(2)

(1) 聚集指标极值归一化模型：

$$\omega = -\frac{1}{2}\ln\frac{S_1^2/m_1}{S_2^2/m_2}$$

(2) 最大最小法模型：

$$X' = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

(3) 模糊关系矩阵模型：

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{m}(x_{ik} \wedge x_{jk})}{\sum_{k=1}^{m}(x_{ik} \vee x_{jk})}$$

自回归和非线性回归并联混合回归模型

黄伟建，齐雨藻，丘璇鸿：大鹏湾夜光藻种群动态机制模型辨识　生态学报, 1992, 12(3)

(1) 夜光藻种群动态机制模型：

$$\begin{cases} y_t = \sum_{i=1}^{p} a_i y_{t-i} + u_t \\ u_t = \sum_{j=1}^{r_1}\beta_{1j}T_{t-j}^2 + \sum_{j=1}^{r_2}\beta_{2j}N_{t-j}^2 + \\ \quad \sum_{j=1}^{r_3}\beta_{3j}P_{t-j} - \sum_{j=1}^{r_4}\beta_{4j}P_{t-j}^2 + \varepsilon_t \end{cases}$$

式中，y_t 为夜光藻自身增长的种群密度；a_i 为自回归系数；p 为自回归的阶数；u_t 为控制变量；T 为温度；N 为可溶性无机氮；P 为可溶性无机磷；r 为相应的控制变量的阶数；β 为非线性回归系数；ε_t 为模型残差量。

(2) 拟合残差平方和函数模型：

$$S(\alpha,\beta) = \sum_{t=p+1}^{n}(y_t - \sum_{i=1}^{p} a_i y_{t-i} - u_t)^2$$

种群无性系生长格局分析模型

王昱生，李景信：羊草种群无性系生长格局的研究　植物生态学与地植物学学报, 1992, 16(3)

(1) 羊草种群无性细分株的空间移动位置 $F(R)$ 模型：

$$F(R) = 1 - e^{-R^2/4Dt}$$

式中，R 为移动距离；D 为扩散常数；t 为时间(a)。

(2) 期望平方位移 $E[R^2(t)]$ 模型：

$$E[R^2(t)] = 4Dt + C_0$$

式中，C_0 为初始位置方差；t 为时间；D 为年龄大的

无性系分株的扩散速率(扩散常数)。

(3) 扩散常数 D 模型：

$$D=\frac{1}{4}\left\{E[L]^2+\frac{2E[L^2](c-c^2-s^2)}{(1-c)^2+s^2}\right\}$$

式中，$E[L]$ 为期望根茎长度；$E[L^2]$ 为期望平方根茎长度；c 和 s 分别为期望余弦和正弦。

棉田施药后棉蚜种群动态模型

吴孔明，刘芹轩：杀虫剂诱使棉蚜再猖獗的研究．生态学报，1992，12(4)

$$N_t=N_0a^{-1}(1-P)e^{r_m}$$

式中，a 为天敌的控制能力，其值越大说明天敌的控制能力越强；N_0 为施药前虫量；P 为防治效果；r_m 为内禀增长率。

模糊数学排序模型

张金屯：模糊数学排序及其应用．生态学报，1992，12(4)

(1) 相关系数模型：

$$R_{ij}=\frac{\sum_{k=1}^{m}X_{ik}X_{jk}}{\sqrt{\left(\sum_{k=1}^{m}X_{ik}^2\right)\left(\sum_{k=1}^{m}X_{jk}^2\right)}}$$

$$(i,j=1,2,\cdots,n(\text{样地数}))$$

$$(k=1,2,\cdots,m(\text{种群数}))$$

式中，R_{ij} 为样地 i 和 j 间的相似系数；X_{ik} 和 X_{jk} 为第 i 和第 j 个样地 k 个植物种的观测值。

(2) 隶属函数模型：

$$\mu_c(x)=\frac{\sum_{y\neq x}\{R_{xy}[\mu_A(y)]\}}{\sum_{y\neq x}[\mu_A(y)]}$$

式中，$\mu_c(x)$ 为样地 x 在模糊子集 C 中的隶属度；$\mu_A(y)$ 为样地 y 在 A 中的隶属度；R_{xy} 为样地 x 和 y 的相似系数。

主要水分渗透和综合抗干旱指数

李庆梅，徐化成：油松 P-V 曲线主要水分参数随季节和种源的变化．植物生态学与地植物学学报，1992，16(4)

(1) 渗透势 ψ_S 模型：

$$\psi_S=\frac{1}{V}\cdot R_{TNS}$$

其中，V 为溶液体积；R_{TNS} 为常量；T 为绝对温度；N_S 为溶液的渗透有效物质的克分子浓度。

(2) 综合抗旱指数 DI 模型：

$$DI=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{P}{P_0}\right)^2}$$

式中，P 为每一种水分参数各种源的测定值；P_0 为诸种源中该水分参数在各次测定中绝对值最大者。

地块连通性和排列对动物复合种群动力学的影响模型

Wu J, Vankat J L, Barlas Y：地块连通性和排列对动物复合种群动力学的影响——仿真研究．Ecological Modelling，1993，65

(1) 一个简单但广泛使用的土地利用模型是 Levin 的初始模型，它描述了在由同质地块构成的异质环境中单一物种复合种群的动力学：

$$\frac{dp}{dt}=mp(1-p)-ep$$

式中，p 是物种占据的地块的比例；m 和 e 分别是与移植能力和灭绝率有关的常数。

(2) 一个简单的连续扩散反应模型是一个偏微分方程：

$$\frac{\partial N(x,t)}{\partial t}=Nf(N)+\frac{\partial[D\partial N(x,t)]}{\partial x}$$

式中，$N(x,t)$ 是对于空间位置 x 的种群密度；D 是种群个体的扩散率；$f(N)$ 是种群生长率。相应的离散模型为 $\frac{dN_i}{dt}=N_if(N_i)+\sum_{j\neq i}[d_{ij}(N_j-N_i)]$，$d_{ij}$ 是地块 i 和 j 之间的个体交换率，N_i 是地块 i 中的种群规模。

草原生态系统狭翅雏蝗种群的能量动态模型

邱星辉，李鸿昌：草原生态系统狭翅雏蝗种群的能量动态．生态学报，1993，13(1)

(1) 次级生产量模型：

$$P=S+\sum_{i=2}^{n}[(N_i+N_{i-1})/2](\overline{E}_i-\overline{E}_{i-1})$$

式中，N_i 为每平方米的蝗虫数；$\overline{E}_i$ 为时间 i 蝗虫个体的平均能值；i 为取样时间；S 为初级取样样本的现存量。

(2) 狭翅雏蝗种群的能量参数模型：

1) 取食量模型：

$$C=\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{7}N_{ik}C_{rk}D_i$$

2) 排泄量模型：

$$FU=\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{7}N_{ik}F_{rk}D_i$$

3) 取食掉落毁损量模型：

$$D=\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{7}N_{ik}D_{rk}D_i$$

4) 呼吸量模型：

$$R=2.58\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{7}R_{ik}W_kN_{ik}D_i$$

式中，N_{ik}为取样区间$(i\text{-}1\sim i)$，K发育阶段个体的平均数量；C_{rk}、F_{rk}和D_{rk}分别为K发育阶段个体的平均取食量、日排泄量和取食掉落毁损量；R_{ik}为取样区间(i-1至i)，K发育阶段个体的平均单位体重日耗氧量；D_i为取样区间的间隔天数；K为个体所处的发育阶段(K=1~5表示1~5龄蛹，K=6为雄性成虫、K=7为雌成虫)；i为取样时间。

慈竹的热值 Q 模型

苏智先，黄炳平，牟德俊等：慈竹无性系种群能值特点及其影响能值计测因素的研究．植物生态学与地植物学学报，1993，17(3)

$$Q=\frac{K[(T+h)-(T_0+h_0)+\Delta t]-\sum gb}{G}$$

式中，T为直接观察到的主期的最终温度；T_0为直接观察到的主期的最初温度；h_0为温度为T_0时对温度计刻度的校正；g为引火线的燃烧热值；G为慈竹样品的重量；K为热量计的水当量；h为温度为T时对温度计刻度的校正；t为热量计热交换校正值；b为实际消耗的引火线重量。

生态位重叠模型

吴为民：怀柔山区灌丛群落优势种群生态位的研究．植物生态学与地植物学学报，1993，17(4)

$$N.O._{ik}=1-0.5\sum\left|P_{ij}-P_{kj}\right|=\sum\min(P_{ij},P_{kj})$$

式中，$N.O._{ik}$为物种i和物种k之间的生态位重叠；P_{ij}、P_{kj}分别为物种i和物种k在j资源位上的重要值百分比率。

两个生理上相同的物种的模型

Ebenhöh W：竞争和共存——建模方法．Ecological Modelling, 1994, 75/76

$$\dot{X}=[R+g(X)]X$$

$$\dot{Y}=[R+g(Y)]Y$$

$$R=1-X-Y$$

$$g(X)=\gamma X/[1-(\alpha X)^2]$$

式中，X和Y分别是两个物种的密度；R是集合变量、象食物浓度，捕食者密度、可用空间等；γ和α是参数。对于这个例子，两个物种能够逐渐共存。

繁殖种群生物生产量模型

朱曦，马水龙，戴水祥等：池鹭繁殖种群数量、活动规律和生物生产量的研究．生态学报，1994，14(1)

(1) 卵鲜物质生物生产量模型：

$$P_{egg}=\frac{W_{egg}N_{egg}}{1000}$$

(2) 卵干物质生物生产量模型：

$$P_{egg}=\frac{W_{egg}(1-79.5\%)N_{egg}}{1000}$$

式中，P_{egg}为鸟产卵的鲜、干物质生物量；W_{egg}为平均卵鲜重；N_{egg}为一对鸟平均一年的产卵数。

(3) 鲜重W_F生长的Logistic曲线方程：

$$W_F=\frac{286}{1+e^{-0.409(t-12.6)}}$$

(4) 干重W_d与鲜重W_F的关系模型：

$$W_d=0.1299W_F^{1.146}$$

(5) 雏鸟生长生物生产量模型：

$$P_{fg}=\frac{(W_f-W_h)N_f}{1000}$$

式中，P_{fg}为一对鸟一年的雏鸟生长生物生产量；W_f为平均一只离巢雏鸟的干重；W_h为雏鸟出壳时的干重；N为育雏数。

九华山土壤动物垂直分布的计算公式

路有成，王宗英：九华山土壤动物的垂直分布．地理研究，1994，13(2)

(1) 等级相关系数计算公式：

$$r = 1 - \frac{6\sum D^2}{n(n^2-1)}$$

式中，r 为等级相关系数；D 为两个相关要素的顺序数之差；n 为调查次数。

(2) 土壤分布系数：

$$A_{DC} = \left(\frac{n}{N} - \frac{m}{M}\right) \times 100$$

式中，A_{DC} 为生境分布系数；n 为某类群土壤动物出现的样方数；N 为调查的总样方数；m 为某类群土壤动物出现的生境数；M 为被调查的生境类型数。

慈竹克隆种群各样品的燃烧热 Q 模型

苏智先，钟章成，廖咏梅等：慈竹克隆种群能量动态研究　生态学报，1994，14(2)

$$Q = -\frac{k[(T+h)-(T_0+h_0)+\Delta t] - \sum gb}{G}$$

式中，k 为热量计的水当量；T 为直接观察到的主期的最终温度；h 为温度为 T 时对温度计刻度的校正；T_0 为直接观察到的主期的最初温度；t 为热量计的热交换校正值；h_0 为温度为 T_0 时对温度计刻度的校正；g 为引火丝的燃烧热；b 为实际消耗的引火丝重量；G 为慈竹样品的重量。

物种更替模型

Kremen C：使用目标分类的生物学目录——马达加斯加岛（非洲岛国）蝴蝶的案例研究　Ecological Applications, 1994, 4(3)

根据对高地倾斜度的研究，相邻高地间的物种更替可以使用下式计算：

$$B = (G+L)/2S$$

式中，G 是物种的增加；L 是物种的减少；S 是物种丰富度。

种群生物量的测定模型

彭少麟，张祝平：鼎湖山针阔叶混交林的第一性生产力研究　生态学报，1994，14(3)

(1) 标准木的胸径 $\overline{D}$ 和高度 $\overline{H}$ 模型：

$$\overline{D} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} d_i$$

$$\overline{H} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} h_i$$

式中，n 为每层中种群总株数；d_i，h_i 分别为该层中第 i 株植物的胸径和高度。

(2) 生物量 W 模型：

$$W = a(D^2H)^b$$

或　$$W = \lg a + b\lg(D^2H)$$

式中，a，b 为待定系数；D、H 分别为胸径和树高。

(3) 净第一性生产力模型：

$$P_n = P_g - R_g' R_g$$

式中，$P_g = 0.67 \cdot F_n \cdot T \cdot S$ 为总光合量；$R_g' = 0.67 \cdot R \cdot T \cdot S$，为叶子的呼吸量；$R_g = 0.67 \cdot F_n \cdot T \cdot W$，为其他器官的呼吸量；$T$ 为总光合量；S 为总叶面积；W 为呼吸器官干重；

$$F_n = \frac{\Delta C \cdot V}{A \cdot 10^3} \times \frac{44}{22.4} \times \frac{273}{273+T} \times \frac{P}{760},$$

为净光合作用速度；

$$R = \frac{\Delta C \cdot V}{g_{WD} \cdot 10^3} \times \frac{44}{22.4} \times \frac{273}{273+T} \times \frac{P}{760},$$

为呼吸作用速度。

式中，ΔC 为叶室或呼吸装置内外气体 CO_2 浓度差；V 为叶室或呼吸装置内外气体流量；A 为叶面积；g_{WD} 为呼吸器官的干重；T 为大气压。

(4) 光能利用效率模型：

$$\varepsilon_F = \frac{\text{群落各层植物的光合产量} \times 18.5(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})}{\text{群落各层植物吸收的光合有效辐射能}(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})} \times 100$$

$$\varepsilon_P = \frac{P_g \times 18.5(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})}{I_{abc}(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})} \times 100$$

式中，ε_F 为各层植物光合产量的效率系数(%)；ε_P 为群落总生产力的效率系数；18.5 为克干物质的含能量；I_{abc} 为被吸收的光和有效辐射能。

典范指示种分析模型

张金屯：典范指示种分析——一个新的外在分类方法。植物生态学与地植物学学报，1994，18(4)

(1) CA 排序轴与环境因子多元回归模型：

$$Z_j = b_0 + \sum_{k=1}^{q} b_k u_{kj}$$

$$(j = 1, 2, \cdots, N)$$

式中，Z_j 为第 j 个样方的排序坐标值；b_0 为截距；b_k 为样方 j 与第 k 个环境因子之间的回归系数；q 为环境因子数；u_{kj} 为第 k 个环境因子在第 j 个样方中的测量值

(2) 每个种的指示值 D_i 模型：

$$D_i = \left|\frac{n_1(i)}{N_1} - \frac{n_2(i)}{N_2}\right|$$

$$(i = 1,2,\cdots;P = \text{种数})$$

式中，$n_1(i)$ 和 $n_2(i)$ 分别为种 i 在 A_1 组和 A_2 组种出现的样方数；N_1 和 N_2 分别为 A_1 组和 A_2 组所含的样方数。

波动环境中定期捕杀的种群的平衡保持模型

Pascual M A，Hilborn R：波动环境中定期捕杀的种群的平衡保持——以Serengeti羚羊为例. The Journal of Applied Ecology. 1995, 32

(1) 羚羊种群的动力学模型：

$$N_{t+1} = [N_t(S_w)^8(S_{d,t})^4 + N_tR_t](1-\gamma)$$

(2) 在年份 t 被捕杀的个体数量 H_t 为：

$$H_t = [N_t(S_w)^8(S_{d,t})^4 + N_tR_t]\gamma$$

式中，N_t 是在年份 t 时羚羊的数量；S_w 是在 8 个月的湿季中存活成体的每月减少率；$S_{d,t}$ 是在 t 年份的 4 个月干季中存活成体的每月减少率；R_t 是每头羚羊的每年补充率，即每个成体加入到成年种群的个体数量。

胸径分布的拟合检验模型

洪利兴，杜国坚，张庆荣等：天然常绿阔叶异龄幼林胸径的Weibull分布及动态预测，植物生态学与地植物学学报，1995，19(1)

(1) 胸径分布函数：

$$W(x;\ \alpha,\beta,\theta) = \begin{cases} 1-\exp\dfrac{-(x-\theta)^\alpha}{\beta} & (x > \theta) \\ 0 & (x \leqslant \theta) \end{cases}$$

式中，x 为随机变量；α，β 和 θ 分别为形状参数、尺度参数和位置参数。

(2) K 阶原点矩 V_k 模型：

$$V_k = \Gamma\left(1+\frac{k}{\alpha}\right)\beta^{k/\alpha}$$

(3) 均值 $E(x)$ 模型：

$$E(x) = \beta^{1/\alpha}\Gamma\left(1+\frac{1}{\alpha}\right)+\theta$$

(4) 方差 Var(x)模型：

$$\mathrm{Var}(x) = \left[\Gamma\left(1+\frac{2}{\alpha}\right)-\Gamma^2\left(1+\frac{1}{\alpha}\right)\right]\cdot\beta^{2/\alpha}$$

(5) 偏度 SK 模型：

$$SK = \frac{1}{Q^3}\left(V_3 - 3V_2V_1 + 2V_1^3\right)$$

(6) 峭度 K 模型：

$$K = \frac{1}{Q^4}\left(V_4 - 4V_3V_1 + 6V_2V_1^2 - 3V_1^4\right)-3$$

式中，Q 为标准差；V_k 为 k 阶原点距。

杂草的生态经济阈值模型

吕德滋，白素娥，李香菊等：升马唐种群生态及其田间密度调控指标的研究. 植物生态学与地植物学学报，1995，19(1)

$$y = \frac{c}{P\cdot V\cdot E} + \frac{F}{P\cdot V}$$

式中，y 玉米产量允许损失率；P 为作物的产量水平；V 为作物的产品价格；E 为除草效果；F 为马唐在阈值水平上创造的价值。

优势种群间联结性测试模型

杜道林，刘玉成，李睿：缙云山亚热带栲树林优势种群间联结性研究. 植物生态学与地植物学学报，1995，19(2)

(1) 多物种间联结显著性检验 VR 模型：

$$VR = \frac{S_T^2}{\delta_T^2}$$

$$S_T^2 = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}(T_j - t)^2$$

$$\delta_T^2 = \sum_{i=1}^{S}P_i(1-P_i)$$

$$P_i = \frac{n_i}{N}$$

式中，S 为总的物种数；N 为总样方数；T_j 为样方 j 内出现的研究物种总数；n_i 为物种 i 出现的样方数；t 为样方中种的平均数。

(2) 成对物种间的联结性检测——χ^2 检验模型：

$$\chi^2=\sum\left[V_{obs}(实测值)-V_{exp}(预期值)\right]^2/V_{exp}$$

$$\chi_t^2=\frac{\left(|ad-bc|-\frac{n}{2}\right)^2 n}{(a-b)(c+d)(a+c)(b+d)}$$

式中，n 为取样总数；a 为两物种均出现的样方数；b，c 分别为仅有种 2 或种 1 出现的样方数；d 为两物种均未出现的样方数。

(3) 关联的测度模型：

Ochiai 指数：$OI=\frac{a}{\sqrt{a+b}\sqrt{a+c}}$

Dice 指数：$DI=\frac{2a}{2a+b+c}$

Jaccard 指数：$JI=\frac{a}{a+b+c}$

式中，JI 常被称为共同出现百分率。

有效种群规模和种群统计模型

Valle C A：稀有的不能飞翔的加拉帕戈斯鸬鹚的有效种群规模和种群统计学．Ecological Applications，1995，5(3)

(1) 每年存活率 (S)：

$$S=(N_x/N_0)^{-x}$$

式中，N_0 是特定年份被标记鸟类的数量；N_x 是 x 年后又被发现的鸟类的数量。

(2) 平均生活期 (L)：

$$L=\sum x(N_x-N_{x+1})\cdot N_0^{-1}$$

(3) 它的变量(L^2) 为：

$$L^2=\sum(N_x-N_{x+1})(x-L)(N_0-1)^{-1}$$

(4) 每个幼体的补充指数(r)为：

$$r=S_j\cdot S_s$$

式中，S_j 和 S_s 是存活到下一年龄段的幼体和接近成体的平均比例。

(5) 仅当每只幼体出生 (J)的数量已知时，那些年中每只年补充率(R)为：

$$R=J\cdot r\cdot n^{-1}$$

式中，n 是本区域每一种性别居民的个体的成体数量。

(6) 每一性别的平均每只一生补充率 (K) 为：

$$K=\sum P_j\cdot r\cdot x\cdot(N_x-N_{x+1})\cdot(N_0)^{-1}$$

式中，P_j 是每只平均幼体年产量。

(7) 到散布距离分布的根平均平方(RMS)距离(σ)如下：

$$\sigma=[(1/N)\sum X_i^2]^{1/2}$$

式中，X_i 是个体 i 散布的距离；N 是特定种类鸟的数量。

(8) 每个相邻区域的有效种群规模(N_e)：

$$N_e=4[T(N_{em}\cdot T_m)^{-1}+T(N_{ef}T_f)^{-1}]^{-1}$$

式中，$T=1/2(T_m+T_f)$是平均一代的时间长度，由雄性(T_m)和雌性(T_f)的一代的时间长度计算出来。N_{em} 是雄性的有效数量；N_{ef} 是雌性的有效数量。

(9) 种群遗传结构作为预期同类群中的遗传方差分量(F_{st})来估算，根据一维"距离隔离"模型计算为：

$$F_{st}=\frac{\sum t_k}{2N_e-\sum t_k}$$

式中，$t_k=\frac{N_e\sqrt{(K-1)}-1}{N_e\sqrt{K}}\cdot t_{k-1}$。

出生-死亡-灾难模型

Andersen M C, Mahato D：California 花斑猫头鹰的种群统计学模型和存量。Ecological Applications, 1995, 5(3)

如果当前种群大小是 x，非常小的时间间隔 Δt 内的个体出生的概率为 $B(x)\Delta t$，个体死亡的概率为 $D(x)\Delta t$，灾难性的环境动荡发生的概率为 $C(x)\Delta t$。如果灾难发生时，规模为 x 的种群中 y 个成员由于灾难死亡的概率为 $Q(y|x)$，则对于一个初始种群规模 x 的预期持续时间遵循如下方程：

$$-1=B(x)T(x-1)+D(x)T(x-1)-[B(x)+D(x)+C(x)]T(x)+C(x)\sum_y Q(y|x)T(x-y)$$

单种种群生态的数学模型

崔启武，李文灿，刘家刚：资源与资源利用者共存系统的数学模型初探．自然资源学报，1995，10(4)

$$\frac{dx}{dt}=\frac{\mu_c X\left(1-\frac{x}{X_m}\right)}{1-\frac{x}{X'_m}}$$

式中，X 为种群密度；μ_c 为种群增值速度参数；X_m

为环境容纳量(以种群密度为单位所表示的环境中的营养物质和空间等条件参数)；X'_m 为一个新的参数，其数值为 X_m+K/α，可定义为在理想条件下，环境中的营养和空间等种群构成物质无损地全部转换为种群密度时，环境所许可的理论种群密度最大值。由于在实际中，这些物质不可能全部无损的转换(在转换中，这些物质要被消耗掉一部分，设这损耗的部分为 K)，故 X'_m 的值比实际的环境容纳量 X_m 的值要大，上式中 X_m 和 X'_m 这两个参数的相对大小将影响该模型的行为

如果 X_m 的数值等于 X'_m 的数值或接近，则转化为指数方程的形式，即：

$$\frac{dx}{dt}=\mu_c X$$

如果 X_m 的数值比 X'_m 的数值小得多，(譬如小一个数量级)，则 $\frac{x}{X'_m}$ 的值相对于分子中 $\frac{x}{X_m}$ 的值也会小得多，则转化为：

$$\frac{dx}{dt}\approx\mu_c X\left(1-\frac{x}{X_m}\right)$$

$$\frac{dY}{dt}=\mu_Y\frac{XY}{K_X+X}-VY$$

式中，资源动态表示资源的自然增长和被消耗(利用)的动态；资源利用者动态表示资源利用者利用资源所得增长和自然死亡的动态。V 为自然死亡率参数。

种群能量动态模型

文峰，丁岩钦：不同类型棉田生态系统中棉蚜种群能量动态及其生态学效率分析 生态学报，1995，15(4)

(1) 种群生产量 P 模型：

$$P=P_m+P_e$$

$$P_m=\sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{5}M_{k,i}\times E_i$$

$$P_e=\sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{4}S_{k,i}e_i$$

式中，P_m、P_e、P 分别为种群的死亡损失量、蜕损失量和生产量；k 为各个不同的调查时期；i 为 1~4 龄若虫和成虫；$M_{k,i}$、$S_{k,i}$ 分别为特定时间(即调查间隔期)k 内的各龄死亡数和若虫发育完成数；E_i，e_i 分别为虫体和蜕的能值。

(2) 种群呼吸耗能量 R 模型：

$$R=\sum_{k=1}^{n}\alpha\beta a\left(\frac{W_k+W_{k+1}}{2}\right)^b\cdot f(T_k)\cdot DD_k$$

式中，α、β 分别为氧卡系数和田间活动修正系数；W_k，W_{k+1} 分别为第 k 和第 $k+1$ 次调查时的生物量；a,b 为常数；DD_k 为第 k 次调查期间的棉蚜生理时间值；$f(T_k)$ 为第 k 次调查时的温度校正值。

(3) 种群排泄量 FU 模型：

$$FU=FU_1+FU_2$$

$$FU_1=\sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{4}\left(S_{k,i}+\frac{M_{k,i}}{2}\right)\cdot FU_i\cdot DD_{k,i}\cdot e$$

$$FU_2=\sum_{k=1}^{n}(S_{k,5}+N_{k,5})\cdot FU_5\cdot DD_{k,5}\cdot e$$

式中，FU_1，FU_2 分别为棉蚜若虫和成虫的排泄量；FU_i，$FU_{k,5}$ 分别为 1~4 龄若虫和成虫每单位日度的排泄量；$DD_{k,5}$，$DD_{k,i}$ 分别为 1~4 龄若虫和成虫在 k 调查期内的生理学时间；$N_{k,5}$，$S_{k,5}$ 分别为成虫数和发育进入成虫的数量；e 为蜜露的热值。

头盔蜜雀的灭绝动力学模型

McCarthy M A：头盔蜜雀的灭绝动力学——种群统计学、随机性、近亲交配和空间结构 Ecological Modelling, 1996, 85

(1) 由于近亲交配，幼体存活数的减少量：

$$s'=se^{-bF}$$

式中，s' 是在近亲交配的影响下，幼体的存活数量；s 是在忽略近亲交配的影响下，幼体的存活数量；b 是每个单倍体基因组中的致命基因的数目；F 是个体的近亲交配系数。

(2) 密度依赖：

由于按照它们的正常存活率繁殖，存活的个体将会减少。正常存活率是如下比例式：

$$s_{DD}=\frac{CC}{NF}$$

式中，CC 为曾经存在的浮游生物的最大数量；NF 是浮游生物的数量

(3) 预测 Yellingbo 地区头盔蜜雀虫口灭绝危险度的方程：

$$\ln\frac{p}{1-p}=87.6-44.2s_{sb}-23.5s_{wb}-3.50s_{sn}-17.0s_{wn}+$$

$$19.2v_s-1.30f_s-3.86f_l-34.7(sr-sr^2)-$$

$$0.424\alpha_f-0.730\alpha_m+0.412r-22390b-$$

$$6.47c+0.329l+b(1630s_{sb}+1030s_{wb}-$$

$$497v_s+131f_l+35.0\alpha_f)+c(8.16s_{wn}-$$

$$3.70v_s+0.946f_l-0.480\alpha_f-0.350r)$$

式中，p 是灭绝的危险度；s_{sb} 是繁殖期哺乳雏鸟的存活率；s_{wb} 是非繁殖期哺乳雏鸟的存活率；s_{sn} 是繁殖期非哺乳雏鸟的存活率；s_{wn} 是非繁殖期非哺乳雏鸟的存活率；v_s 是由于环境随时间发生改变，存活率中变量的系数；f_s 是未阉割的配偶的生育力；s_r 是后代的性别比；α_k 是雌性($k=f$)和雄性($k=m$)的平均扩散距离；r 反映了从灭绝地再度移民地能力；b 是每年中火灾的可能性；c 是在各个立地中发生火灾的相关性；l 是用每个个体致命基因的数目来表示的近亲交配削弱的力度。

污染状况下增长率 $r(C)$ 计算模型

Hendriks A J, Enserink E L：使用一个物种规模函数模拟单物种种群对微小污染物的反应——以水蚤和鸬鹚为例. Ecological Modelling, 1996, 88

$$\frac{r(C)}{r(0)}=\frac{-\ln[1+(C/LC50)^{(1/\beta)}]-\ln[1+(C/EC50)^{(1/\beta)}]}{\ln\left(\int_0^{\infty}l(a)m(a)\mathrm{d}a\right)}+1$$

式中，$l(a)$ 是至少存活到年龄 a 的部分；$m(a)$ 表示间隔 $\mathrm{d}a$ 期间产生的后代；C 是污染物浓度，中等亚致死量($EC50$)和致死量($LC50$)浓度分别表示 $l(a)$ 和 $m(a)$ 减少 50%；β 是浓度响应斜率的值。

树种群模型中的温度影响模型

Schenk H J：模拟温度对树种生长和持续的影响——一个树种群模型的关键回顾. Ecological Modelling, 1996, 92

(1) 每年温度对树种 i 半径增长的影响可以由树的增长方程乘以一个抛物线函数得到：

$$f_i(T)=\max[0,f_i(D_a)]$$

$$f_i(D_a)=\frac{4(D_a-D_{\min(i)})(D_{\max(i)}-D_a)}{(D_{\max(i)}-D_{\min(i)})^2}$$

式中，D_a 是本生境当年的度日数；$D_{\min(i)}$ 是对树种 i 来说太冷而不能生长的度日值；$D_{\max(i)}$ 是对树种 i 来说太热而不能生长的度日值。

(2) 随净同化作用不断变化的每天温度反应计算如下：

$$f_i(\overline{T_d})=\frac{4(\overline{T_d}-T_{\min(i)})(T_{\max(i)}-\overline{T_d})}{(T_{\max(i)}-T_{\min(i)})^2}$$

式中，$T_{\min}$ 和 $T_{\max}$ 分别是净碳同化作用的最低和最高温度；$\overline{T_d}$ 是平均每日温度。

(3) 由于一个因素影响的每年净同化作用减少量：

$$\phi(T)=\frac{\sum_d f(\overline{T_d})}{365}$$

式中，总和对落叶树来说是 $\overline{T_d}>5$ ℃的时期，而对于常绿树种来说是 $\overline{T_d}>0$ ℃的时期。

(4) 每天边材的呼吸作用变量计算为：

$$\delta_i(T)=Q_{10}^{(\overline{T_d}-T_{ref})/10}$$

式中，Q_{10} 是参数；T_{ref} 是参考温度。

(5) 一个特定物种的有效温度总和，D_i，对于生长期由下式给出：

$$D_i=\sum_{d=\mathrm{first}}^{\mathrm{last}}[\overline{T_d}-T_{\min(i)}]$$

(6) 生长受限温度因子被计算为：

$$f(D_i)=\frac{D_i}{\max_{\{i|i\in y\}}D_i}$$

式中，y 是出现在地块上的所有树种。

亮叶水青冈种群遗传多样性模型

李俊清：亮叶水青冈种群遗传多样性初步研究. 生态学报，1996, 16(2)

(1) 基因频率 x_i 模型：

$$x_i=\left(2_{ii}+\Sigma_{ij}\right)/2n$$

式中，ii 为纯合子数；ij 为包含一个 I 等位基因的杂合子数；n 为种群个体数量。

(2) 固定指数模型：

1) 第 k 个种群第 i 个等位基因的固定指数 F_{ISki} 模型：

$$F_{ISki}=\frac{X_{kii}-x_{ki}^2}{x_{ki}(1-x_{ki})}$$

2）2 个等位基因的情况下，第 i 个等位基因的固定指数模型：

$$F_{ISi}=\frac{X_{ii}-\overline{x_i^2}}{\overline{x_i}-\overline{x_i^2}}$$

$$F_{ITi}=\frac{X_{ii}-(\overline{x_i})^2}{\overline{x_i}-(\overline{x_i})^2}$$

$$F_{STi}=\frac{\overline{x_i^2}-(\overline{x_i})^2}{\overline{x_i}-(\overline{x_i})^2}$$

式中，F_{IS} 和 F_{IT} 是 2 个结合子与亚种群及其与该种植物所有种群的相互关系，它们代表了种群内和所有种群总的等位基因分化；F_{ST} 是从每一种群随机抽取 2 配子之间的相互关系，它代表种群之间的等位基因关系；x_i 为第 i 个等位基因的频率；X_{ii} 为第 i 个等位基因的纯合子频率；且有：$X_{ii}=\sum_k X_{kii}/s$；$\overline{x_i}=\sum_k X_{ki}/s$；$\overline{x_i^2}=\sum_i x_{ki}^2/s$，$s$ 位种群数量，k 为第 k 个种群。

（3）基因多样性 h_i 模型：

$$h_i=1-\sum x_i^2$$

（4）遗传距离模型：

1）最小遗传距离 D_m 模型：

$$D_m=D_{xy}-(D_x+D_y)/2$$
$$D_{xy}=1-P_{xy};\ D_x=1-P_x;\ D_y=1-P_y$$
$$P_{xy}=\sum x_iy_i;\ P_x=\sum x_i^2;\ P_y=\sum y_i^2$$

式中，x_i 和 y_i 分别为种群 x 和种群 y 在同一基因位点上第 i 个等位基因的频率。

2）标准遗传距离 D 模型：

$$D=-\ln I$$
$$I=P_{xy}/(P_xP_y)^{1/2}$$

3）最大遗传距离 D_v 模型：

$$D_v=(1-I)/I$$

Gini 系数

陈小勇，张庆费，吴化前等：黄山西坡青冈种群结构与分布格局研究．生态学报，1996，16(3)

$$Gini\ 系数=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}|x_i-x_j|}{2n^2\overline{x}}$$

式中，x_i、x_j 分别为个体 i，j 的大小。

种群分布密度

朴仁珠：截线法对西藏盘羊种群数量的估计．生态学报，1996，16(3)

$$\hat{D}=n\cdot f(0)/2L$$

式中，n 为期望动物数；L 为截线长度；$f(0)$ 为 0 点概率密度函数。

包容生态因子的广义 Logistic 模型

于强，傅抱璞，姚克敏：包容生态因子的广义 Logistic 模型．生态学报，1996，16(3)

$$f(p)t=\frac{a}{\mu_0}+\frac{1}{\mu_0}\ln x-\frac{\alpha}{\mu_0}\ln(x_m-x)$$

式中，x 为种群密度；x_m 为环境所允许的种群密度极限；μ_0 为生态因子适宜时的种群增长率；$f(p)$ 为生态因子影响函数；α，a 为参数；t 为时间。

种群灭绝时间预测模型

Grasman J, HilleRisLambers R：中等种群的本地灭绝．Ecological Modelling, 1997, 103

（1）种群灭绝的预期时间：

$$T(x)=2K\int_0^x\int_t^x\frac{\exp\{2K[\phi(t)-\phi(s)]\}}{a(s)}\mathrm{d}s\mathrm{d}t$$

式中，$x=N/K$，N 是种群，K 是承载力；$\phi(x)=\int_x^1\frac{b(s)}{a(s)}\mathrm{d}s$；$b(x)=\alpha(1-x)x$ 且 $a(x)=(\beta+\alpha x)x$，$\alpha=b-d$，$\beta=b+d$。

（2）时间间隔（$t,t+\Delta t$）上的跃进概率如下：

$$P(N\to N+1)=bN\Delta t$$

$$P(N\to N-1)=(dN+\frac{\alpha}{K}N^2)\Delta t$$

则 $T(1)$ 满足：

$$\frac{\ln T(1)}{2K}\approx\phi(0)=-1+\frac{\alpha+\beta}{\alpha}\ln\frac{\alpha+\beta}{\beta}$$

种群持续时间的估算模型

Middleton D A J, Nisbet R M：种群持续时间：估算、模型和机制．Ecological Applications, 1997, 7(1)

（1）种群模型：

$$N_{t+1}=\lambda_tN_t$$

式中，N_t是时间t的种群规模；λ_t是独立的、一致分布的正的随机变量。

(2) 一个更有用的统计量是长期增长率，被定义为：

$$c = E[\lg(\lambda_t)]$$

式中，如果 $c \leq 0$，这个模型表明物种灭绝是一定的，并且意味着还能持续的时间与 $|c|$ 成反比例；如果 $c>0$，模型表明灭绝的概率<1，依赖于灭绝极限的期望持续时间也与 c 成反比例。

(3) 带有密度无关的关键比率和上限的封闭种群：

$$N_{t+1} = \begin{cases} \lambda_t N_t & (\lambda_t N_t < N_{\max}) \\ N_{\max} & (\text{其他}) \end{cases}$$

式中，$\lambda_t = \frac{r_t j_t}{2} + a_t$；$r_t$是每对个体的再生育率；$j_t$是在$t+1$年份幼体的存活率；$a_t$是下一年成体的存活率；$N_{\max}$是本区域能够支持的喂养个体的最大数量。

(4) Middleton et al. 认为所谓持久稳定的种群是指长期增长率超过某个临界值 c_0 的状态,如下：

$$c_0 = 2Dm_0 / \ln(N_{\max} / N_{\min})$$

式中，$2D$ 是长期增长率的变化值；$N_{\min}$ 是物种要灭绝的水平；m_0 是无维度参数的临界值。

(5) 如果种群个体的移出看作是附加的死亡率，可以将乘数增长率写作：

$$\lambda_t^e = \frac{r_t j_t}{2} + \frac{a_t N_t - E_t}{N_t}$$

式中，E_t 是从种群中移出的个体数目。

(6) 模型中的平均持续时间可以被估算为：

$$E(T) = \frac{\tau}{2} e^{2m} (1 - e^{-\alpha} - \alpha e^{2m})$$

式中，$\tau = 2D / c^2$；$m = c\ln(N_{\max} / N_{\min}) / (2D)$；$\alpha = c\ln(N_0 / N_{\min}) / D$。

大头茶种群的幼苗群、幼树群和成年个体群间盖度模型

李旭光，于法稳：大头茶种群动态模型及稳定性分析．植物生态学报，1997，21(1)

$$\dot{U} = a_1 W - r_{(w)} U - a_3 U$$
$$\dot{V} = a_3 b_1 U - b_2 V - b_3 V$$
$$\dot{W} = b_2 c_1 V - c_2 W$$
$$r_{(w)} = a_2 W - r_0$$

式中，$r_{(w)}$为幼苗死亡率；a_2、a_3、b_2、b_3、c_2和r_0为常数；a_0为繁殖系数；$b_1 = \frac{S_2}{S_1}$；$a_1 = a_0 \frac{S_1}{S_3}$；$c_1 = \frac{S_3}{S_2}$；$S_1$，$S_2$和$S_3$分别为幼苗群、幼树群和成年个体群每个个体林冠平均投影盖度。

生殖值 V_x

孙凡，钟章成：缙云山四川大头茶种群繁殖适应性的数量特征研究．植物生态学报，1997，21(1)

$$V_x = b_x + \sum_{t=x+1}^{a} \frac{l_t}{l_x} b_t$$

式中，$\frac{l_t}{l_x}$表示从年龄x到$x+1$的生殖概率；b_x和b_t分别为年龄x与$x+1$时种群的平均生育力；a为最后一次生殖时的年龄。

种群增长模型的广延 Logistic 模型

李新运，赵善伦，尤作亮等：一种自适应的种群增长模型及参数估计．生态学报，1997，17(3)

$$\frac{\mathrm{d}x(t)}{\mathrm{d}t} = rx(t)\left[1 - \frac{x(t)}{x_{\mathrm{m}}}\right]$$

$$x(t) = \frac{x_{\mathrm{m}}}{1 + \left(\frac{x_{\mathrm{m}}}{x_0} - 1\right) e^{-rt}}$$

式中，$x(t)$，x_{m}，r 分别为种群的大小、环境容纳量和潜在的比增长速度参数。

生态位宽度与生态位重叠模型

王仁忠：放牧影响下羊草草地主要植物种群生态位与生态位重叠的研究．植物生态学报，1997，21(4)

(1) 生态位宽度 NB 模型：

$$NB = \frac{\lg \sum N_{ij} - \left(1/\sum N_{ij}\right)\left(\sum N_{ij} \lg N_{ij}\right)}{\lg r}$$

式中，N_{ij} 为种 i 在资源 j 上的优势度；r 为资源等级数。

(2) 生态位重叠模型：

$$NO = \sum N_{ij} N_{kj} \Big/ \sqrt{\sum N_{ij}^2 \sum N_{kj}^2}$$

式中，NO 为生态位重叠值；N_{ij} 和 N_{kj} 为种 j 和 k 在资源 j 上的优势度

种群分布格局分析模型

郑元润：不同方法在沙地云杉种群分布格局分析中的适应性研究. 植物生态学报，1997，21(5)

(1) 方差 V 与均值 m 模型：

$$V = \sum_{i=1}^{N} (X_i - m)^2 \Big/ (N-1)$$

$$m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} X_i$$

式中，N 为样方树；X_i 为每样方中的个体数。

(2) 聚集强度指数：

1) 丛生指标 I 模型：

$$I = (V/m) - 1$$

式中，I=0，为随机分布；I> 0，为聚集分布；I<0，为均匀分布

2) 扩散系数 C 模型：

$$C = \frac{V}{m}$$

玛他种群遗传模型

徐宏发，陆厚基，王小明：玛他种群：种群生态学理论应用于保护生物学实践的新范例. 生态学杂志，1998，17(1)

$$F = \frac{(1-m)^2}{2N_e - (1-m)^2(2N_e - 1)} \approx \frac{1}{4N_e m + 1}$$

式中，F 为近亲繁殖系数；m 为每一个世代的迁移率；N_e 为局部种群的有效大小。

人工林种群最优密度决策模型

吴承祯，洪伟：人工林经营过程密度最优控制研究. 自然资源学报，1998，13(2)

(1) 采用任意间隔期生长预估的密度二次效应模型：

$$M = aH^b \cdot N - cH^d \cdot N^2$$

式中，M 为林分单位面积蓄积($m^3 \cdot hm^{-2}$)；H 为 t 年时的平均优势高(m)，它由地位指数曲线计算得到；N 为林分单位面积蓄积株数(株·hm^{-2})；a、b、c 和 d 为参数。

由于人工林林分的间伐是在多个时刻点上进行，因此林分密度控制是一个多步决策过程(设进行 l 次决策)，其状态转移方程为：

$$N_{i+1} = N_i - n_i = N_i'$$

$$M_{i+1} = M_i - V_i + \Delta M(i, i+1)$$

式中，N_i，N_i' 为第 i 次采伐前、后的立木密度(株·hm^{-2})；n_i 和 V_i 为第 i 次采伐株数(株·hm^{-2})、材积($m^3 \cdot hm^{-2}$)；M_i 为第 i 次采伐前蓄积($m^3 \cdot hm^{-2}$)；$\Delta M(i, i+1)$ 为第 i 次采伐至 $i+1$ 次采伐之间的蓄积净增量。

边界条件：

$$(N_1, M_1) = (N_0, M_0)$$

$$(N_{l+1}, M_{l+1}) = (0, 0)$$

目标函数：

$$J_l = \sum_{i=1}^{l} R_i$$

式中，R_i 为第 i 次采伐量($m^3 \cdot hm^{-2}$)

最优林分密度控制，就是要寻求最优决策序列 N_i^*，使林分生长系统在决策作用下，从初时状态运行到终端状态，并实现目标函数的指标值最大

$$J_l^* = \max_{N_1^*, \cdots, N_l^*} \left\{ \sum_{i=1}^{l} R_i \right\}$$

用动态规划法求解 J_l^*，就可以导出最优林分密度决策模型：

$$N_i^* = \frac{a(H_{i-1}^b - H_i^b)}{2c(H_{i+1}^d - H_i^d)}$$

$$J_{l-(i-1)}^* = aH_i^b N_i - cH_i^d N_i^2 + \Delta M(i, i+1) + \cdots + \Delta M(l-1, l)$$

反曲原甲藻种群变化率动态模型

黄贯虹：大鹏湾反曲原甲藻种群变化率动态模型研究. 生态学杂志，1998，17(2)

$$\frac{dQ_t}{dt} = a_0 + a_1 \frac{dQ_{t-1}}{dt} + a_2 Q_{t-1} + a_3 T_t + a_4 \frac{dT_t}{dt} + a_5 N_t + a_6 \frac{dN_t}{dt} + a_7 P_t + a_8 \frac{dP_t}{dt}$$

式中，$\frac{dQ_t}{dt}$ 为反曲原甲藻在 t 时间的种群密度变化率；a_0

为模型的回归常数，待辨识参数；$a_1,a_2,\cdots,a_8$ 为各因素在模型中对反曲原甲藻生长影响的回归系数，待辨识参数；$\frac{dQ_{t-1}}{dt}$ 为反曲原甲藻在 $t-1$ 时间的种群密度变化率；Q_{t-1} 为反曲原甲藻在 $t-1$ 时间的种群密度；T_t 为 t 时间的海水温度；$\frac{dT_t}{dt}$ 为 t 时间的海水温度变化率；N_t 为 t 时间可溶性硝态氮和可溶性亚硝态氮之和密度；$\frac{dN_t}{dt}$ 为 t 时间可溶性硝态氮和可溶性亚硝态氮之和密度变化率；P_t 为 t 时间可溶无机磷浓度；$\frac{dP_t}{dt}$ 为 t 时间可溶无机磷浓度变化率。

杉木种源胸径生长地理变异规律

洪伟，吴承祯：杉木种源胸径生长地理变异规律的研究. 植物生态学报，1998，22(2)

(1) "krige" 空间内插技术：

点内插的"krige"线性系统方程：

$$\begin{cases}\sum_{i=1}^{N}\lambda_i(p_i,p_j)+\phi=r(p_i,p_0) \\ \sum_{i=1}^{N}\lambda_i=1\end{cases}\quad (i=1,2,\cdots,N)$$

式中，$r(p_i,p_j)$ 为观测点 p_i 和 p_j 之间的半方差；$r(p_i,p_0)$ 为半方差曲线模型计算出点 p_i 与内插点 p_0 之间的半方差数值；ϕ 为与方差最小化有关的拉格朗日乘数。

(2) 空间半方差曲线新模型：

多项式拟合模型：

$$\begin{cases}r(h)=a_0+a_1h+a_2h^2+\cdots & (h>0) \\ r(h)=0 & (h=0)\end{cases}$$

不整齐性指标及遗传学分析模型

李晓平，王刚，赵松岭：不同水分条件下春小麦种群中个体大小不整齐性及遗传学分析. 植物生态学报，1998，22(2)

(1) 不整齐性指标——Gini 系数模型：

$$Gini=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}|x_i-x_j|}{2n^2\bar{x}}$$

$$\text{无偏值 } G'=\frac{n-1}{n}G$$

式中，n 为样本容量；$\bar{x}$ 为样本均值；x_i、x_j 为任意二样本值。

(2) 不整齐性的遗传学分析模型：

$$GS_0=SH\times h_{SH}^2$$

式中，GS_0 为自然选择强度；SH 为大小不整齐性；h_{SH}^2 为不整齐性的遗传力。

邻近的灌木丰度测量

Wagner R G, Radosevich S R：用邻近法定量分析俄勒冈州海岸森林中的种间竞争. Ecological Applications, 1998, 8(3)

(1) 当灌木比最适宜的周边灌木的高度矮时，灌木指数为：

$$I_{\text{shrub}}=\sum_{i=1}^{N}a_i\left(\frac{h_i/D}{O}\right)^W$$

式中，a_i 是在那一年中一个周边灌木种或个体 i 的丰度；h_i 是在那一年中一个周边灌木种或个体 i 的最大高度；D 是那一年中道格拉斯冷杉树苗的最大高度；O 是那一个年最佳周边高度；N 是那一个里周边灌木种的数量；W 是加权系数。

(2) 使用邻近距离来表示的指数：

$$I_{\text{shrub}}=\sum_{i=1}^{N}a_i(1-d_i/r)^W$$

式中，N 是邻近区域中种或个体植物的数量；a_i 是指邻近区域中种 i 的丰度或个体植物 i 的多少；d_i 是指从道格拉斯冷杉的茎干到种 i 或个体植物 i 的冠顶的最近距离；r 是邻近区域的半径。

(3) 用角分布表示的指数：

$$I_{\text{shrub}}=A(\text{AD})^W$$

式中，A 是指邻近区域的灌木的丰度；AD 是灌木的角分布。

种群偏离度与种群扩散率的估计模型

温俊宝，李友常，夏乃斌等：杨树光肩星天牛成虫扩散格局的研究. 生态学报，1998，18(3)

(1) 种群偏离度的估计：

种群扩散的偏离度模型：

$$K_u=\frac{N\sum_{p=0\to 1}d_p^4n_p}{\left(\sum_{p=0\to 1}d_p^2n_p\right)^2}$$

式中，N 为在所有回收点中捕到的天牛总数；d_p 为再

回收点与释放点的距离；n_p 为与释放点间距离的各回收点中捕到的天牛总数。

(2) 种群扩散率的估计：

$$D=\sqrt{\frac{\sum(d^2)}{N}}$$

式中，d 为回收点与释放点的距离；N 为回收点的标志天牛数。

种群传播模型

Sharov A A, Liebhold A M：用屏障带减缓舞毒蛾传播的模型。Ecological Applications, 1998, 8(4)

(1) 根据福雷斯特模型的群体密度变化：

$$\frac{\partial m}{\partial t}=-\frac{\partial m}{\partial a}$$

式中，$m(a,z,t)$ 是指在时间 t、空间位置为 z、年龄为 a 的每单位面积群体的平均密度。

(2) 新群体建立的速率：

$$m(0,z,t)=b[z-Z(t)]$$

式中，$Z(t)$ 是指在时间 t 种群向前迁移的位置。

(3) 个体在时间 t 和位置 z 的平均密度 $N(z,t)$ 为：

$$N(z,t)=\int_0^{\infty}m(a,z,t)n(a)\mathrm{d}a$$

式中，$n(a)$ 是一个群体中个体的数量。

(4) 假定一个群体中个体的数量 $n(a)$ 随群体年龄 a 呈指数曲线增长：

$$n(a)=n_0\exp(ra)$$

式中，n_0 是指在新的群体中最初个体数；r 是指增长的固有速度。

迁移的种群模型

Madenjian C P, Schloesser D W, Krieger K A：伊利湖西部穴居飞蝼蛄再度迁移的种群模型。Ecological Applications, 1998, 8(4)

生物体的数量的增加是对一个生态系统的入侵或者殖民：

$$N_t=N_0\frac{K}{(K-N_0)e^{-r_0t}+N_0}$$

式中，N_t 是时间 t 的种群个体数量；N_0 是在 0 时间的种群个体数量；r_0 是最大的种群个体增长率；K 是承载力。

种相似与属相似系数

张镱锂：植物区系地理研究中的重要参数. 地理研究, 1998, 17(4)

(1) 种相似性系数的计算公式：

1) Jaccard 系数：

$$S_J=\frac{c}{A+B-c}\times100\%$$

或

$$=\frac{c}{a+b-c}\times100\%$$

式中，S_J 为 Jaccard 系数；A 为甲地区全部种数；B 为乙地区全部树种；c 为两个地区共有种数；a 为甲地区独有种；b 为乙地区独有种；A，B，c 均不含世界种和外来种。

2) Czechanowski 系数：

$$S_C=\frac{c}{(A+B)/2}\times100\%$$

或

$$=\frac{c}{(a+b+2c)/2}\times100\%$$

式中，S_C 为 Czechanowski 系数。

(2) 属相似系数：

$$S_S=\frac{C}{A}\times100\%(A<B)$$

或

$$S_S=\frac{C}{B}\times100\%(B<A)$$

式中，S_S 为属相似系数；A，B 分别为甲乙两地区植物区系中非世界属数；C 为两个地区共有的非世界属数。

能量固定与能量吸收特征模型

倪穗、周光裕：青冈种群的能量积累. 生态学杂志, 1998, 17(5)

(1) 能量固定特征——固定的能量 P_g 模型：

$$P_g=P_n+R_d$$

式中，P_n 为积累的能量；R_d 为呼吸损耗的能量。

(2) 能量吸收特征——能量吸收量 R_{ga} 模型：

$$R_{ga}=P_g+T$$

式中，T 为蒸腾能量损耗量。

耦合映像格子模型

李镇清：描述 Meta-种群动态的耦合映像格子模型. 植物生态学报, 1998, 22(5)

$$x_{n+1}(i)=(1-\varepsilon)f(x_n(i))+\varepsilon[\alpha f(x_n(i-1))+(1-\alpha)f(x_n(i+1))]$$

式中，x 为系统状态；n 为离散化后的时间变量；i 为生径板块的坐标(i=1,2,…，L)；L 为系统尺度；ε 为扩散系数；$\alpha=0$ 时，为单向耦合格子；$\alpha=0.5$ 时，为扩散的耦合映像格子。

林分密度效应动态模拟模型

吴卫国，李景文，陆兆华：山杨林林分密度效应动态模拟．植物生态学报，1998，22(5)

（1）林窗模型：

$$\frac{d(D^2H)}{dt}=\left(1-\frac{W}{W_{max}}\right)\int_B S_L^H[\gamma P(z)-\delta z]dz$$

式中，D^2H 为材积指数，表示林木生长量；W 为模拟样地的潜在生物量；W_{max} 为模拟样地的最大潜在生物量；γ 和 δ 表示树种的同化作用与作用常数；D 为胸径；H 为树高；B 为枝下高；z 为从树梢到林冠层某一高度的距离；S_L 为林木有活枝部分的叶面积线密度；$P(z)$ 为林冠层 z 处光强条件下树木的同化作用效率。

（2）密度效应函数：

$$\overline{W_t}=gN^{-\frac{3}{2}}$$

式中，$\overline{W}$ 为个体平均生物量；N 为模拟林分密度；g 为常数。

种群遗传模型

李俊清，吴刚，刘雪萍：四川南江两种水青冈种群遗传多样性初步研究．生态学报，1999，19(1)

（1）基因频率 x_i 模型：

$$x_i=\frac{2(ii)+\sum ij}{2N}$$

式中，(ii)代表纯合子数；ij 代表包含一个 i 等位基因的杂异合子数；N 为种群个体数量。

（2）基因多样性模型：

$$h=1-\sum x_i^2$$

式中，h 为某位点的基因多样性观测值。

（3）遗传距离 D 模型：

$$D=-\ln I$$

$$I=\frac{P_{xy}}{(P_xP_y)^{1/2}}$$

$$P_{xy}=\sum x_iy_i$$

$$P_x=\sum x_i^2$$

$$P_y=\sum y_i^2$$

式中，x_i 和 y_i 代表种群 x 和种群 y 在同一基因位点上第 i 个等位基因的概率

（4）Hardy-Weihberg 平衡模型：

$$\chi^2=\sum\frac{|O-E|-0.5}{E}$$

式中，O 为观测值；E 为理论值

（5）固定指数 Fis 模型：

$$Fis=\frac{X-x^2}{x(1-x)}$$

式中，X 为某等位基因纯合子基因型概率；当种群自交和杂合子适合度小于纯合子时，Fis>0；相反，当种群自交和杂合子适合度大于纯合子时，Fis<0。

种群数量增长速度模型

Sibly R M：研究动物种群中的压力与种群密度的有效实验设计．Ecological Applications，1999，9(2)

（1）在一个不考虑年龄结构、种群中个体数为 N、在时间 t 时、增长速度为 $\Delta N/\Delta t$ 的种群中，r 可用正式表示：

$$r=\frac{1}{N}\frac{\Delta N}{\Delta t}$$

（2）忽略年龄结构的长期微观测试，如果种群数量在时间 0 时为 N_0，在时间 t 是为 N_t，则有：

$$r=\frac{1}{t}\ln\frac{N_t}{N_0}$$

（3）考虑年龄结构，如果一个有性繁殖种群处于一个稳定的年龄结构，并且包括有那些从出生至年龄 t_i 时有 l_i 的存活可能性的个体，当它们繁殖 $2b_i$ 个后代时，则 r 可从下面的 Euler-Lotkawc 公式得到：

$$1=\sum_i l_ib_ie^{-rt_i}$$

偏倚度 G

吴冬秀，王根轩：半干旱条件下春小麦种群不整齐性动态及其水分生理生态基础. 生态学报，1999，19(2)

$$G=\frac{n\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^3}{S^3(n-1)(n-2)}$$

式中，n 为样方中植株数；x_i 为样方中植株 i 的干重；$\bar{x}$ 为样方的植株均重；S 为样方中植株干重的均方差。

种群间联结关系模型

李先琨，黄玉清，苏宗明：南方红豆杉群落主要树木种群间联结关系初步研究 生态学杂志，1999，18(3)

（1）主要树木种群间的总体相关性检验模型：

$$R_v=\frac{{S_T}^2}{{\sigma_T}^2}$$

式中，R_v 为方差比率；${\sigma_T}^2=\sum_{i=1}^{s}P_i(1-P_i)$ 为总样本数方差；${S_T}^2=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}(T_j-t)^2$ 为总种数方差；$P_i=\frac{n_i}{N}$；$t=\frac{T_1+T_2+\cdots+T_N}{N}$，$N$ 为样方总数；T_j 为第 j 样方树种总和；n_i 为第 i 树种出现样方数。

（2）Jaccard(JI)指数模型：

$$JI=\frac{a}{a+b+c}$$

式中，JI 指数亦称共同出现百分率。

（3）联结系数 AC 模型：

$$AC=\frac{ad-bc}{(a+b)(b+d)}(ad>bc)$$
$$AC=\frac{ad-bc}{(a+b)(a+c)}(ad<bc \text{ 且 } d>a)$$
$$AC=\frac{ad-bc}{(d+c)(b+d)}(ad<bc \text{ 且 } d<a)$$

式中，AC 的值域为[-1,1]，AC 值越趋近于 1，表明物种间的正联结性越强；AC 值越趋近于-1，表明物种间的负联结性越强；AC=0，物种间相对独立。

（4）点相关系数 φ 模型：

$$\varphi^2=\frac{ad-bc}{\sqrt{(a+b)(a+c)(c+d)(b+d)}}$$

（5）χ^2 检验模型：

$$\chi^2=\frac{\left(|ad-bcx|-\frac{N}{2}\right)^2}{\sqrt{(a+b)(c+d)(a+c)(b+d)}}$$

雌性个体与任一雄性至少交配一次的概率

Grevstad F S：影响种群建立的变化的因素：在生物防除中的释放战略的含义. Ecological Applications. 1999. 9(4)

$$P=1-(1-a)^M$$

式中，a 是指特定雌性个体与特定雄性交配的概率；M 是种群中雄性的个数。

假设 $a=1-(1/2)^{1/A}$，A 是指 Allee 影响强度，则有：$P=1-(1/2)^{M/A}$。

发育历期模型

谢立群，张孝羲：烟青虫种群动态模型的研究 生态学报，1999，19(4)

$$D_i(L)=\frac{K_i}{t_0-C_i}$$

式中，t_0 为 L 时刻的温度；$D_i(L)$ 为第 i 虫态、t_0 温度下的发育历期；K_i 为第 i 虫态的有效积温；C_i 为发育起点温度。

种群时空预测模型

周国法，徐汝梅，李天生：昆虫种群动态时空回归预测方法及应用研究，生态学报，1999，19(4)

（1）一般自回归形式：

$$Z_{i,jt+1}=a+b_{01}Z_{i,j,t}+b_{11}\sum_{(k,l)\in NB}W(h)Z_{k,l,t}+\cdots+b_{1p}\sum_{(k,l)\in NB}W(h)Z_{k,l,t}$$

式中，$W(h)$为权函数；p 为回归的阶数。

（2）混合回归形式：

$$Z_{i,j,t+1}=a+b_{01}Z_{i,j,t}+b_{11}\sum_{(k,l)\in NB}W(h)Z_{k,l,t}+\cdots+b_{1p}\sum_{(k,l)\in NB}W(h)Z_{k,l,t}+b_{21}X_{i,j,t}+b_{21}\sum_{(k,l)\in NB}W(h)X_{k,l,t}+\cdots+b_{2p}\sum_{(k,l)\in NB}W(h)X_{k,l,t}$$

式中，$W_1(h)$ 为混合回归权函数；p 为混合回归的阶数。

Lotka Volterra 竞争模型

陈德辉，刘永定：微囊藻和栅藻共培养试验及其竞争参数的计算. 生态学报，1999，19(6)

$$\frac{N_{sn}-N_{sn-1}}{t_n-t_{n-1}}=r_sN_{sn-1}\frac{K_s-N_{sn-1}-\alpha N_{mn-1}}{K_s}$$

$$\frac{N_{mn}-N_{mn-1}}{t_n-t_{n-1}}=r_mN_{mn-1}\frac{K_m-N_{mn-1}-\beta N_{sn-1}}{K_m}$$

式中，N_{sn}，N_{mn} 分别为共培养中栅藻和微囊藻在时间 t_n 时的数量；N_{sn-1} 和 N_{mn-1} 分别为共培养中栅藻和微囊藻在时间 t_{n-1} 时的数量；r_s 和 r_m 分别为栅藻和微囊藻的增长率；K_s 和 K_m 分别为栅藻和微囊藻的最大环境容量；α 和 β 分别为共培养中微囊藻对栅藻和栅藻对微囊藻竞争抑制参数。

生态系统生产力模型

Alexandrov GA, Yamagata Y, Oikawa T：世界森林净生态系统生产力模型. Ecological Modelling,1999,123

（1）植物群丛方程：

$$B(a)=b_1P_n\cdot a^{b_2}$$

$$\frac{dL_i}{da}=m_iB-r_iL_i \qquad (i=1,2,3)$$

式中，a 是群丛平均年龄；B 是存活的有机物质中的碳储存量；L_i 是在非存活的有机物质第 i 部分中的碳储存量；P_n 是净初级生产力。

（2）实时森林景观中碳储存量方程：

$$\widetilde{B}=\frac{1}{a_{\max}}P_nb_1\sum_{a=1}^{a_{\max}}p_aa^{b_2}$$

$$\widetilde{l}=\frac{1}{a_{\max}}\sum_{a=1}^{a_{\max}}p_aL_i(a), \qquad (i=1,2,3)$$

式中，p_a 森林土地中被年龄为 a 的群丛所占据的比例。

植物群丛尺度上的碳分配与干物质生长模型

Valentine H T：应用碳分配模型估计具有均匀年龄分布的植物群丛的净初级生产力. Ecological Modelling, 1999, 122

（1）活的干物质成分通过下式估计：

$$\bar{F}=z_FA$$

$$\bar{R}=z_RA$$

$$\bar{\Xi}=z_WAL$$

式中，$\bar{F}$，$\bar{R}$ 和 $\bar{\Xi}$ 分别是活叶、根和树干的干物质量；z_F 和 z_R 分别是具有活性的单位面积管道的叶和根的干物质量(kg·cm^{-2})；z_W 是树干单位湿体积的干物质量(kg·cm^{-3})；A 是具有活性的管道面积；L 是从根到叶面的活性管道的平均长度。

（2）生产率的计算：

$$d\bar{F}^+/dt=z_FdA^+/dt+z_FA/\upsilon_F$$

$$d\bar{R}^+/dt=z_RdA^+/dt+z_RA/\upsilon_R$$

$$d\bar{\Xi}^+/dt=z_W\omega LdA^+/dt+z_WAdL_M/dt$$

式中，$d\bar{F}^+/dt$，$d\bar{R}^+dt$ 和 $d\bar{\Xi}^+/dt$ 分别定义了 $\bar{F}$，$\bar{R}$ 和 $\bar{\Xi}$ 的生产率；dA^+/dt 是 A 的扩展率(m^2·hm^{-2}·a^{-1})；υ_R 和 υ_F 分别是叶面和根的存活寿命；z_FA/υ_F 和 z_RA/υ_R 分别是衰老的叶面和根替代部分的生产率；ωL 是新生活性管道的平均长度；$z_W\omega LdA^+/dt$ 是新生的活性管道的平均生产率；dL_M/dt 是现存活性管道延长的平均速率(m·a^{-1})；z_WAdL_M/dt 是由于管道延长而导致的树干干物质生产率。

$$dA^+/dt=\frac{\lambda_A[\hat{\Omega}-(1+c_F)z_FA/\upsilon_F-(1+c_R)z_RA/\upsilon_R]}{(1+c_F)z_F+(1+c_R)z_R+(1+c_W)z_W\omega L}$$

$$dL_M/dt=\frac{\lambda_L[\hat{\Omega}-(1+c_F)z_FA/\upsilon_F-(1+c_R)z_RA/\upsilon_R]}{(1+c_W)z_WA}$$

式中，$\lambda_A+\lambda_L=1$，而且 $\hat{\Omega}=\bar{s}\cdot I\cdot z_FA-m_Fz_FA-m_Rz_RA-m_Wz_WAL$；$\bar{s}$ 是未遮蔽叶片碳生产率，I 是参数。

（3）将未遮蔽叶片转换为所有叶片可表达为：

$$d\bar{F}^-/dt=z_FdA^-/dt+z_FA/\upsilon_F$$

$$d\bar{R}^-/dt=z_RdA^-/dt+z_RA/\upsilon_R$$

$$d\bar{\Xi}^-/dt=z_W\theta LdA^-/dt$$

式中，z_FdA^-/dt 是由于树枝死亡等原因导致的管道失去活性而引起的叶片干物质的损失率，同时还有根干物质的损失率 z_RdA^-/dt，由于叶片和根死亡而导致的干物质损失率为 z_FA/υ_F 和 z_RA/υ_R，θL 是失去活性的管道的平均长度，当植物群丛闭合时，

$dA^+/dt=(A/\zeta)^{\varepsilon}dA^-/dt$，而且有：

$$dL/dt=dL_M/dt+(L/A)\times$$

$$[(\omega-1)dA^+/dt-(1-\theta)dA^-/dt]$$

$$\omega=L/(\omega_1+1)$$

$$I=\rho/(\rho+A)$$

式中，ω_1是常数(m)；ρ是一个关于碳生产率的标度参数($m^2 \cdot hm^{-2}$)。

物种相似性指数

Krings A. Sonoran 和 Chihuahuan 沙漠地区藤本植物区系的植物地理特征. Journal of Biogeography, 2000,27

$$物种相似性(\%)=\frac{2C}{A+B}\times 100$$

式中，C是两个生境中共享的物种的数量；A和B是在每一个生境中现存物种的数量。

物种-地区之间的关系模型

Baldi A, Kisbenedek T：匈牙利 Velence 湖芦苇群岛上鸟类物种的数量. Global Ecology and Biogeography, 2000, 9

$$s(\alpha)=S-\sum(1-\alpha)^{n_i}$$

式中，s是样本中物种的数量；α是样本的相对面积；S是所有样本中的物种数量；n_i是第i物种的个体数量；Σ表示所有物种的总和。

落叶松种群格局的分形模型

马克明，祖元刚：兴安落叶松种群格局的分形特征——信息维数. 生态学报，2000，20(2)

$$D_I=\lim\frac{I(\varepsilon)}{\ln(\varepsilon)}$$

$$I(\varepsilon)=\sum I_i$$

$$I_i=-P_i\ln P_i$$

$$P_i=\frac{N_i}{N}$$

式中，N_i为每个非空格子中拥有的个体数目；N为样方内总个体数目。

谱分析模型

吴明作，刘玉萃：栓皮栎种群数量动态的谱分析与稳定性. 生态学杂志，2000，19(4)

$$N_t=A_0+\sum_{k=1}^{p}A_k\sin(\omega_k t+\theta_k)$$

式中，N_t为t时刻种群大小；A_0为周期变化的平均；A_k为各谐波的振幅，标志其所起作用大小；ω_k，θ_k分别为斜波频率及相角。

Meta-种群结构及其遗传后果模型

陈小勇，房宁：Meta-种群结构及其遗传后果. 生态学杂志，2000，19(5)

(1) Meta-种群结构的类型及其特征：

Meta-种群模型：

$$\frac{dp}{dt}=mp(1-p)-ep$$

式中，p为被占领斑块的比例；m和e分别表示定居和灭绝。

(2) Meta-种群结构的遗传后果

发生迁移后，岛屿种群中该等位基因的频率P_1模型：

$$P_1=P-m(P-P_m)$$
$$\Delta P=P_1-P=-m(P-P_m)$$

式中，m为流向岛屿种群的每代大陆种群占岛屿种群的比例；P为岛屿种群；P_m为大陆种群某等位基因的频率。

种群可持续增长区数学模型

Yue T X：种群可持续增长区数学模型. Progress in Natural Science，2000, 10(8)

Odum在讨论了种群增长的研究成果以后，得出了三个结论：①在易变的环境中，种群的最佳密度(式中，种群密度被定义为单位面积上的个体数量)大约为最大承载能力K(在可持续发展意义上单位面积可允许承载的最大个体数量)的50%；②从持续发展的观点来看，最大承载能力和最佳密度之间的区域是种群的可持续增长区；③种群可持续增长区常常偏向左边(以$n=0.5K$为中心轴线)。需要进一步研究的问题包括：①在什么条件下，种群的可持续增长区为[0.5K~K]？②在什么条件下，种群的可持续增长区偏向左边？③如果种群的可持续增长区偏向左边，偏移距离为多大？④当种群的可持续增长区偏向左边的时候，其上限和下限如何变化？作者借助耗散结构理论建立了以下模型：

$$\frac{dP(t)}{dt}=Rr^2n(t)\left[1-\frac{n(t)}{K}\right]\left[1-\frac{2n(t)}{K}\right]$$

$$\delta_X P(t) = -\frac{6r^3R}{K^2}\left[n(t)-\left(1-3^{-\frac{1}{2}}\right)\frac{K}{2}\right]\times$$
$$\left[n(t)-\left(1-3^{-\frac{1}{2}}\right)\frac{K}{2}\right][\delta_X n(t)]^2$$

式中，r 为种群的内禀增长率；$n(t)$为单位面积上种群的个体数；K 为单位面积的最大承载能力；R 为尺度常数；t 为时间变量；$P(t)$为熵产生；$\delta_X P(t)$ 为超熵产生。

求解结果表明，在小的扰动之后，种群的可持续增长区为[0.5K~K]；在大的扰动之后，种群的可持续增长区以 $n=0.5K$ 为中心轴线向左偏移，偏移的最大可能距离为$\frac{K}{2\sqrt{3}}$，大约0.289K。也就是说，对自然生态系统、近自然生态系统和半自然生态系统，种群的可持续增长区为[0.5K~K]；对人文生物生态系统和人文技术生态系统，种群的可持续增长区为($0.5K-\frac{K}{2\sqrt{3}}$~$0.5K+\frac{K}{2\sqrt{3}}$)或近似地为[0.211K~0.788K]；并且，人文生物生态系统和人文技术生态系统种群可持续增长区的宽度大于自然生态系统、近自然生态系统和半自然生态系统种群可持续增长区的宽度。

种群数量及其增长的数学模型

Wang G. W. Edge D. Wolff J O：生态风险评估中的统计学随机性．Ecological Modelling，2001，136

（1）灰尾鼠种群数量的 Ricker 动力学模型：

$$N_{t+1} = N_t \exp(r_0 - bN_t)$$

式中，N_{t+1}是 t+1 时刻的种群数量；N_t是 t 时刻的种群数量；r_0 是平均增长率；b 是种群密度对增长率的影响；参数 r_0和 b 通过回归分析得到。

（2）种群的随机增长率的计算公式：

$$r_t = r_0 + (\sigma_d / N_t)s - bN_t$$

式中，σ_d 描述了统计随机性；s 呈高斯分布，中值为0、标准偏差为1的随机变量；参数σ_d 用随机生灭过程估计，$\sigma_d^2 = p(1-p)\lambda^2 + p(1-p)$，$p$ 是生存概率，λ是平均产仔数。

种群密度模型

Wilder JW：初始条件的敏感依赖性及瞬时混沌对 gypsy moths 暴发预测的影响　Ecological Modelling，2001，136

（1）产卵密度与成虫期末密度的关系经验模型：

$$N_e = \begin{cases} GN_s/W_s & (G < 1.25\times10^4 W_s/2) \\ G\dfrac{mN_s - (N_s - N_d)(G - 1.25\times10^4 W_s/2)}{mW_s - (W_s - W_d)(G - 1.25\times10^4 W_s/2)} & \\ \quad (1.25\times10^4 W_s/2 < G < 1.25\times10^6 W_d/2) & \\ GN_d/W_d & (G > 1.25\times10^6 W_d/2) \end{cases}$$

（2）种群密度模型：

$$\frac{dG}{dt} = -c_1G + \alpha c_2\frac{GF}{1-(c_2/c_3)F} - c_4\frac{GP}{1+(c_4/c_5)G}$$

$$\frac{dF}{dt} = c_6F - \frac{c_6}{c_P}F^2 - c_2\frac{GF}{1+(c_2/c_3)F}$$

式中，N_e为每公顷产卵数，G 为每公顷鹰嘴豆在成虫期末时 gypsy moths 的生物量密度，设 $m=(10^6W_d - 12500W_s)/2$；F 为植物生物量密度；P 为捕食者生物量密度；N_s 为种群密度稀疏时每对成虫的产卵数(eggs/egg mass in a sparse population)；N_d 为种群密度稠密时每对成虫的产卵数(eggs/egg mass in a dense population)；W_s 为种群密度稀疏时每对成虫的质量(mass(g) of a pair of large larve in a sparse population)；W_d 为种群密度稠密时每对成虫的质量(mass (g) of a pair of large larve in a dense population)；c_P^{max} 为栖息地最大承载能力(maximum carrying capacity of stand (ghectare^{-1}))；f_0 为植物生物量的初始值(initial value for foliage biomass (ghectare^{-1})；f_i 为 i 小种群每年增长因子(factor by which small populations increase per year)；n 为由于严重的密度过载导致的成虫衰减率(decay rate of larvae due to severe overpopulation)；n_d 为导致 P_d 的落叶年数(number of years of defoliation resulting in p_d)；n_r 为栖息地恢复所需年数(number of years required for recovery of stand)；s_d 为成虫在分散中的生存率(percent of larvae surviving dispersal)；s_w 为成虫越冬的生存率(percent of larvae surviving the winter)；w_L 为新孵出幼虫的质量(mass (g) of a newly hatched larva)；$c_1 = n/[T_{life}\lg(e)]$；c_2 为每克捕食者一定天数捕食的成虫克数；$c_3 = \alpha^{-1}[c_1 + \ln(W_s/2w_L)/T_{life}]$；$c_4 = (PT_{life})^{-1}\ln(s_w s_d N_s/2f_i)$；$c_5$ 为成虫采食率(search rate of larvae for foliage)；c_6 为植物相对生长率(relative growth rate of foliage)；α 为成虫的消化效率(assimilation efficiency of larvae)。

密度依赖和种群增长函数

Broadfoot J D, Rosatte R C, O'Leary D T：加拿大安大略省用于城市疾病防治的浣熊和臭鼬种群模型 Ecological Application, 2001, 11(1)

(1) 用于反应密度依赖影响的函数是一个锐克(Ricker)函数：

$$N(t-1)=\alpha N(t)\exp(-\beta N(t))$$

式中，$N(t)$ 是在时间 t 时的种群数量，α 和 β 是系数。

(2) 迁移函数：

迁移函数反应了动物在亚种群间迁移的交换速度，它是这些亚种群间距离的函数：

$$m_{ij}=\begin{cases}a\exp(-D_{ij}^{c}/b) & (D_{ij}\leqslant D_{\max})\\ 0 & (\text{其他})\end{cases}$$

式中，m_{ij} 是指动物从亚种群 i 迁移到 j 的交换速度；D_{ij} 是指亚种群 i 和 j 间的距离；$D_{\max}$ 是指动物能够迁移的最大距离；a、b 和 c 是指回归系数。

生物学控制的复合种群模型

Kean J M, Barlow N D：*Microctonus aethiopoides* 对 *Sitona iscoideus* 成功的生物学控制的空间模型，The Journal of Applied Ecology, 2001, 38

$$N_{\text{aest}}=\frac{gs_l K_x\exp(-cA)(N_{\text{aut}}-P_{\text{aut}})}{(d+N_{\text{aut}}-P_{\text{aut}})\left\{\frac{p_a}{1-p_a}[1-\exp(-a_1P_{\text{aut}}^{1-m_1})]+1\right\}}$$

$$P_{\text{aest}}=N_{\text{aest}}[1-\exp(-a_1P_{\text{aut}}^{1-m_1})]$$

$$N'_{\text{aut}}=\frac{s_a}{(2n+1)^2}\sum_{x=i-n}^{i+n}\sum_{y=j-n}^{j+n}(N_{\text{aest},x,y}-P_{\text{aest},x,y})$$

$$P_{\text{aut}}=N'_{\text{aut}}\left\{1-\exp\left\{-a_2\left[\frac{s_cp_a}{1-p_a}P_{\text{aest}}+\frac{p_es_d}{(2n-1)^2}\sum_{x=i-n}^{i+n}\sum_{y=j-n}^{j+n}P_{\text{aest},x,y}\right]^{1-m_2}\right\}\right\}$$

式中，N_{aut} 是当前年份秋季的成年象鼻虫峰值密度；N'_{aut} 是来年秋季的象鼻虫密度；$P_{\text{aut}}=N_{\text{aut}}Q_{\text{aut}}$，$Q_{\text{aut}}$ 是寄生的秋季象鼻虫部分；$P_{\text{aut}}=N_{\text{aest}}Q_{\text{aest}}$，$Q_{\text{aest}}$ 是寄生的夏季夏眠的象鼻虫部分；N_{aest} 是夏眠的象鼻虫总数；d 是象鼻虫幼虫的密度依赖性参数；c 是农作物承载力随年龄下降的速率；K_x 是农作物对象鼻虫幼虫的最大承载力；s_l 是象鼻虫幼虫成长为幼成体的存活率；s_d 是象鼻虫夏眠和扩散后的存活率；a_1 是夏季拟寄生物的搜索参数；m_1 是夏季拟寄生物干扰参数；p_a 是经历了非典型发育之后的寄生象鼻虫部分；s_c 是整个夏季的农作物中寄生象鼻虫的增长率；p_e 是到三月份时迁入的寄生象鼻虫部分；a_2 是秋季拟寄生物的搜索参数；m_2 是秋季拟寄生物的干扰参数；下标 x 和 y 表示位置。

金雀花种群动态模型

Rees M, Hill R：金雀花种群的大比例尺扰动、生物学控制和动力学 The Journal of Applied Ecology, 2001, 38

(1) 一个近似的分析模型：

$$\begin{aligned}U_{t+1}=&(1-p_{\text{dist}})[U_t+G_tz_{\max}(1-p_{\text{so}})]+\\&p_{\text{dist}}(1-p_{\text{ngc}})[U_t+G_t(1-f_r)]+\\&p_{\text{dist}}G_tf_r(1-p_{\text{gc}})+O_t(1-p_{\text{gc}})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}G_{t+1}=&(1-p_{\text{dist}})G_t(1-z_{\max})+\\&p_{\text{dist}}[G_tf_rp_{\text{gc}}+G_t(1-f_r)p_{\text{ngc}}+\\&U_tp_{\text{ngc}}]+O_tp_{\text{gc}}\end{aligned}$$

$$O_{t+1}=(1-p_{\text{dist}})G_tz_{\max}p_{\text{so}}$$

$$S_{t+1}=(1-d)S_t+FG_tf_r$$

式中，G_t 是在 t 时间被金雀花占据的生境部分；U_t 是不适宜金雀花生长的生境部分；O_t 是开放的生境部分；S_t 是每个生境的种子的平均数；p_{gc} 和 p_{ngc} 分别是先前包含再生金雀花植物和不包含再生金雀花植物的开放生境的概率；p_{dist} 是扰动的概率；$z_{\max}$ 是最大年龄段的金雀花植物所占的比例；p_{so} 是包含衰老植物的生境适合增加后继衰老植物的概率；f_r 是繁殖年龄段的金雀花植物的比例。

(2) 金雀花占据的生境的平衡比例：

$$G^*=\frac{p_{\text{dist}}}{1-(1-p_{\text{dist}})[(1-z_{\max})+(1-p_{\text{dist}})z_{\max}p_{\text{so}}]}$$

$$S^*=\frac{FG^*f_r}{d}$$

种群扩散仿真模型

Higgins S I, Richardson D M, Cowling R M：外来植物种群扩散空间仿真模型的检验 The Journal of Applied Ecology, 2001, 38

(1) 火灾模型：

火灾的概率(p_f) 假设随植被年龄函数而增加

$$P_i = \frac{1}{1+\exp(f-a)}$$

式中，f 是火灾复原间隔常数；a 是植被年龄(a)。

(2) 增殖模型：

一棵尺寸为 d 的树在 m 米远处产生的新个体的数量(R)：

$$R = R_s\left(\frac{d}{d_s}\right)^2 \frac{1}{n} e^{-sm^3}$$

式中，R_s 是标准尺寸为 d_s 的一棵树产生的新个体数量；s 是分散度参数；n 是一个正规化子。

(3) 火灾存活概率（P_s）：

$$P_s = l + \frac{u-l}{1+\exp\frac{b-d}{v}}$$

式中，l 是直径小于 b 的一棵树的存活概率；u 是直径大于 b 的一棵树的存活概率；v 是描述 l 和 u 之间斜率的常数。

银鱼种群数量变动的数学模型

黄真理，常剑波：银鱼的产量能预报吗？生态学报，2001，21(1)

$$N_{t+1} = r\left(\frac{1+r}{r} - \frac{N_t}{N_{\max}}\right)N_t - FN_t$$

式中，N_{t+1}、N_t 分别为(t+1)和 t 年的种群数量；$N_{\max}$ 为水域所能容许的最大种群数量；r 为内禀增长率；F 为捕捞死亡系数。

棉蚜种群寄主转换的适应和变异规律模型

张孝羲，赵静雅，张广学等：棉蚜种群寄主转换的适应和变异规律研究．生态学报，2001，21(1)

(1) 种群存活率 $F(t)$模型：

$$F(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{b}\right)^c\right]$$

式中，b 为位置参数；c 为曲线形状参数。

(2) 种群生命表参数 r_m 模型：

$$r_m = \ln\frac{R_0}{T}$$

$$R_0 = \sum l_x M_x$$

$$T = \frac{\sum l_x M_x X}{\sum l_x M_x}$$

$$l_x = \frac{N_t}{N_0}$$

$$M_x = \frac{F}{N_t}$$

式中，N_0 为种群起始数量；N_t 为 t 时刻的存活数；F 为 t 时刻的产仔数；l_x 为存活率；M_x 为平均产雌率。

(3) 高氏距离 $D_{(i,j)}$模型：

$$D_{(i,j)} = \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m}\frac{\left|X_{ik} - X_{jk}\right|}{R_k}$$

式中，k 为属性；m 为属性数；R_k 为第 k 属性所有样本的极差；X_{ik} 为第 i 处理的第 k 个属性的值；X_{jk} 为第 j 处理的第 k 个属性的值。

空间自相关分析

陈小勇：安徽黄山青冈种群遗传结构的空间自相关分析．植物生态学报，2001，25(1)

Moran's I 指数模型：

$$I = \frac{n\sum_i\sum_j W_{ij}Z_iZ_j}{\sum_i\sum_j W_{ij}\sum_i Z_i^2}$$

式中，n 为植物个体数；W_{ij} 为权重；Z_i、Z_j 分别为植株 i、j 的转换值。

种的生态位适宜度 *NF* 指数

唐海萍，史培军，李自珍：沙坡头地区配置格局油蒿和柠条水分生态位适宜度研究．植物生态学报，2001，25(1)

$$NF = \sum_{i=1}^{n} W_i \frac{x_i}{x_{ia}}$$

式中，n 为生态因子个数；x_i 为第 i 层的生态因子实测值；x_{ia} 为第 i 层的生态因子最适值；W_i 为第 i 层权重因子。

生殖价 V_x

吴明作，刘玉萃，姜志林：栓皮栎种群生殖生态与稳定性机制研究．生态学报，2001，21(2)

$$V_x = m_x + \sum_{t=x+1}^{a}\frac{l_t}{l_x}m_t$$

式中，V_x 为一个特定年龄的个体死亡前可能产生的子

代数目的量度；l_x、l_t、m_x 和 m_t 分别为年龄 x、t 时的存活概率及平均生育力；α 为最大生殖年龄

L-Logistic 模型

刘金福，洪伟．格氏栲种群低势度增长改进模型的研究．植物生态学报，2001，25(2)

$$\frac{dS}{dt}=rS\left(1-\frac{S^{\theta}}{K^{\varphi}}\right)$$

式中，θ，φ 为密度制约参数。

物种数模型

黄孝，藏润国，蒋有绪：海南岛霸王岭不同热带森林类型的种-个体关系．植物生态学报，2001，25(3)

$$y=y_0e^{-[a(R-R_0)]^2}$$

式中，y 为坐标轴上第 R 个倍频的物种数；y_0 为众数倍频 R_0 的物种数；a 为常数

生态位宽度和重叠模型

王琳，张金屯：濒危植物矮牡丹的生态位研究．生态学杂志，2001，20(4)

(1) 生态位宽度模型：

1) Levins 生态位宽度模型：

$$B_i=\frac{1}{\sum_j^r\left(\frac{n_{ij}}{N_i}\right)^2}$$

式中，B_i 为种群 i 的生态位宽度；n_{ij} 为种群 i 利用资源状态 j 的数量；N_i 为种群 i 的总数量；r 为样地数。

2) Shannon Wiener 生态位宽度模型：

$$B_i=-\sum_j^r\left(\frac{n_{ij}}{N_i}\right)\ln\left(\frac{n_{ij}}{N_i}\right)$$

(2) 生态位重叠模型：

1) 成对种群间生态位特定重叠 SO_{ik} 模型：

$$SO_{ik}=e^{E_{ik}}$$

$$E_{ik}=\sum_j^r(P_{ij}\ln P_{kj})-\sum_j^r(P_{ij}\ln P_{ij})$$

$$P_{ij}=\frac{n_{ij}}{N_i}$$

式中，k 为不同于 i 的另一种

2) 所有种群间生态位普遍重叠 GO 模型：

$$GO=e^{E}$$

$$E=\frac{\sum_i^s\sum_j^r n_{ij}[(\ln C_j-\ln P_{ij})]}{T}$$

式中，T 为群落中全部考虑种群的总数

种间竞争指数

邹春静，韩士杰，张军辉：阔叶红松林树种间竞争关系及其营林意义．生态学杂志，2001，20(4)

$$CI=\sum_{j=1}^{N}\frac{D_j}{D_i}\frac{1}{L_{ij}}$$

式中，CI 为竞争指数，CI 越大，表明数种之间的竞争越激烈；D_i 为对象木 i 的胸径；D_j 为竞争木 j 的胸径；L_{ij} 为对象木 i 与竞争木 j 之间的距离；N 为竞争木的株数

确定关键种的模型

黄建辉，韩兴国：关键种，关键在哪里？植物生态学报，2001，25(4)

(1) 群落重要性指数 CI_i 模型：

$$CI_i=\frac{t_N-t_D}{t_N}\frac{1}{p_i}$$

式中，t_N 为改变前群落或生态系统特征的定量测度；t_D 为物种 i 被去除后群落或生态系统特征的定量测度；p_i 为物种 i 被去除前在生态系统中的相对多度。

(2) 关键性指数模型：

$$K(i)=K_b(i)+K_t(i)$$

$$K_b(i)=\frac{1+K_b(j)}{m(i)(j)}$$

$$K_t(i)=\frac{1+K_t(j)}{n(i)(j)}$$

式中，$K(i)$为物种 i 的关键性指数；$K_b(i)$为种 i 上行关键性指数；$K_b(j)$为种 j 上行关键性指数；$m(i)(j)$为物种 j 的直接猎物种类数量；$K_t(i)$为种 i 下达关键性指数；$K_t(j)$为种 j 下达关键性指数；$m(i)(j)$为物种 j 的直接捕食者种类数量。

(3) 功能重要性指数 I_i 模型：

$$I_i=\sum_{j=1}^{s}\left|P_{j,t=1}-P_{j,t=0}\right|$$

式中，$P_{j,t=1}$ 和 $P_{j,t=0}$ 分别为第 j 个物种被去除后(t=1)和前(t=0)的生产力。

群的空间分布格局与环境的关系模型

姜安如，阎国法：天山中段主要植被类型中种群的空间分布格局与环境的关系 植物生态学报，2001，25(4)

(1) 相关系数 R 模型：

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{N}[Z(x_i)-\bar{Z}][Y(x_i)-\bar{Y}]}{\sigma(Z)\sigma(Y)}$$

式中，N 为样本数；$Z(x_i)$ 和 $Y(x_i)$ 分别为变量 Z 和 Y 的观测值；$\bar{Z}$ 和 $\bar{Y}$ 分别为变量 Z 和 Y 的样本平均值；$\sigma(Z)$ 和 $\sigma(Y)$ 分别为变量 Z 和 Y 的标准差。

(2) 空间相关系数 $R(h)$ 模型：

$$R(h)=\frac{\sum_{i=1}^{N(h)}[Z(x_i)-\bar{Z}][Y(x_i+h)-\bar{Y}]}{\sigma(-h)\sigma(+h)}$$

$$\sigma^2(-h)=\frac{\sum_{i=1}^{N(h)}[Y(x_i+h)-\bar{Y}]^2}{N(h)}$$

$$\sigma^2(h)=\frac{\sum_{i=1}^{N(h)}[Z(x_i)-\bar{Z}]^2}{N(h)}$$

式中，$N(h)$为样本数；$Z(x_i)$和$Y(x_i)$分别为两个不同空间变量Z和Y的观测值；$\bar{Z}$ 和$\bar{Y}$ 分别为变量Z和Y的样本平均值；$\sigma(-h)$ 和$\sigma(-h)$ 分别为变量Z和Y的标准差。

(3) 空间相关指数 SI 模型：

$$SI=\int_0^D R(h)\mathrm{d}h$$

式中，D 为从原点到第一次为零时的横轴距离。

生态位的测度模型

沈泽昊、方精云：基于种群分布地形格局的两种水青冈生态位比较研究 植物生态学报，2001，25(4)

(1) Levins 生态位宽度模型：

$$B_i=-\sum P_{ij}\lg P_{ij}$$

$$(j=1,2,\cdots,r)$$

式中，B_i 为种 i 的生态位宽度；P_{ij} 为种 i 对第 j 个资源的利用占它对全部资源利用的比例；r 为资源等级数。

(2) Huelbert 生态位宽度 B_a 模型：

$$B_a=\frac{B_s-1}{r-1}$$

$$B_s=\frac{1}{\sum(P_{ij}^2)}$$

(3) 生态位重叠 NO 模型：

$$NO=\frac{\sum n_{ij}n_{kj}}{\sum n_{ij}^2\sum n_{kj}^2}$$

式中，n_{ij} 和 n_{kj} 分别为种 i 和种 k 在资源 j 上的数量。

优势树种生态位测度模型

吴大荣：福建罗卜岩闽楠林中优势树种生态位研究 生态学报，2001，21(5)

生态位宽度模型：

$$B_{(SW)i}=-\frac{1}{\lg S}\sum_{j=1}^{r}P_{ij}\lg P_{ij}$$

$$P_{ij}=\frac{n_{ij}}{Y_i}$$

$$Y_i=\sum_{i=1}^{n}n_{ij}$$

式中，$B_{(SW)i}$ 为树种 i 的生态位宽度；P_{ij} 为树种 i 利用第 j 资源占它利用全部资源比例；S 为种群数；r 为资源位数；n_{ij} 为树种 i 在第 j 资源位的重要值；Y_i 为树种 i 所利用全部资源位的重要值之和。

(2) 生态位重叠模型：

$$L_{ih}=B_{(L)i}\sum_{j=1}^{r}P_{ij}P_{hj}$$

$$L_{hi}=B_{(L)h}\sum_{j=1}^{r}P_{ij}P_{hj}$$

$$B_{(L)i}=\frac{1}{r\sum_{j=1}^{r}P_{ij}^2}$$

式中，L_{ih} 为树种 i 重叠树种 h 的生态重叠指标；L_{hi} 为树种 h 重叠树种 i 的生态重叠指标；B_L 为 Levins 的生态位宽度指数。

棉铃虫发生量预报模型

王西平、杨彬云、相云等：河北省棉铃虫种群数量的气象综合预报方法的研究 生态学报，2001，21(6)

(1) 棉铃虫发生量的生物潜能预报模型：

$$y = ax + b$$

式中，y 为发生程度预报值；x 为上一代发生量，做第二代预报时，x 为上年度第四代或越冬代发生量

(2) 棉铃虫生物气象综合预报模型：

$$y = \sum_{i=1,n} b_i' y_i$$

$$b_i' = \frac{b_i}{\sum_{i=1,n} b_i}$$

式中，y_i 为第 i 种模型的预报值；y 为棉铃虫发生程度的综合预报结果；b_i' 为第 i 种模型的集成权重

第二十一章　群落与生态系统生态学

水平植物群丛中的光线测定模型

Cowan I R：水平植物群丛中的光线. Journal of Applied Ecology, 1971, 8(2)

(1) 植物群丛内向上和向下的辐射流：

$$\frac{d\Phi^+}{dA}=(1-t)\Phi^+-r\Phi^-$$

$$\frac{d\Phi^-}{dA}=r\Phi^+-(1-t)\Phi^-$$

式中，Φ^+ 和 Φ^- 是植物群丛内向上和向下的辐射流；A 是土地表层每单位面积累积的叶面积；t 和 r 是叶片传输和反射的系数。方程的求解条件为：$\Phi^+=\Phi_L^+$ 在植物群丛的顶部，$A=L$（叶面积指数）并且在 $A=0$ 时 $\Phi^-=r_G\Phi^+$（r_G 是地表的反射系数），$\Phi^+=\Phi_L^+[(1-t-rr_G)\sinh(KA)+K\cosh(KA)]/C$，$\Phi^-=\Phi_L^+[(r-r_G-tr_G)\sinh(KA)+Kr_G\cosh(KA)]/C$，$C=(1-t-rr_G)\sinh(KL)+K\cosh(KL)$，$K=[(1-t)^2-r^2]^{\frac{1}{2}}$。

(2) 忽略 r_G 作为整体的植物群丛透射系数为：

$$T=e^{KL}/(ae^{2KL}-a+1)$$

(3) 植物群丛的反射系数为：

$$R=b(e^{2KL}-1)/(ae^{2KL}-a+1)$$

式中，$a=\frac{1}{2}+\frac{1}{2}(1-t)/[(1-t)^2-r^2]^{1/2}$，$b=\frac{1}{2}r/[(1-t)^2-r^2]^{1/2}$。

热带生态系统中的太阳辐射和生产力模型

Monteith J L：热带生态系统中的太阳辐射和生产力. Journal of Applied Ecology, 1972, 9(3)

(1) 整个系统效率的计算公式：

$$\varepsilon=\varepsilon_g\varepsilon_a\varepsilon_s\varepsilon_q\varepsilon_i\varepsilon_d\varepsilon_r$$

式中，农作物或者天然群落以效率 ε 生产的干物质被定义为任意时期光合作用储存的净太阳能；ε_g 是几何因子；ε_a 是大气层传输因子；ε_s 是光谱因子；ε_q 是光化学效率；ε_i 是中途拦截效率；ε_d 是扩散效率；ε_r 是呼吸作用因子。

(2) 暴露在直射光下的叶片面积 A_0：

$$A_0=(1-s^L)/(1-s)$$

式中，$1-s$ 是在组成单位叶面积指数的树叶层上的中途拦截的辐射部分；L 是总的叶面积指数。

(3) 被照射的叶片的总光合作用为：

$$P_0=A_0[a+b/(1-s)I]^{-1}$$

式中，a 和 b 是强光和弱光条件下的因子；I 是水平树叶的辐射。

取样数目估计模型

阳含熙：植物群落研究的取样问题. 自然资源，1978，2

(1) 不连续函数：

$$n_0=\frac{4PQ}{L^2}$$

(2) 连续函数：

$$n_0=\frac{4S^2}{L^2}$$

式中，L 为允许误差；P 为某一事物出现的概率；$Q=1-P$；S^2 为方差。

植物群落信息分析模型

阳含熙，卢泽愚，杨周南：植物群落数量分类的研究——二、信息分析和主坐标分析. 自然资源，1979，1

$$I=pn\lg n-\sum_{j=1}^{p}\left[a_j\lg a_j+(n-a_j)\lg(n-a_j)\right]$$

式中，I 为样方组中所有种的总信息量；p 为 n 个样方分别记录的种的个数；n 为样方数；$a_j(j=1,2,\cdots,p)$ 为 a 个样方包括有 j 个种。

CONIFER 模型

Swartzman G L：流过生态系统的物质及能量流的模型——方法及其文件资料. Ecological Modelling, 1979, 7

(1) 蒸发的 Penman 方程(辐射输入枯枝落叶层的热量忽略不计)：

$$G_{14}=\max\left\{0,\frac{B_{163}\{S_1(X_{25})-S_1[Z_5-(Z_3-X_{25})]\}B_{155}B_{154}B_{159}}{B_{157}B_{158}}\right\}$$

式中，G_{14}是枯枝落叶层的潜在蒸发率；X_{25}是枯枝落叶层温度；$S_1(X_{25})$是在枯枝落叶层温度处的水汽压；$S_1[Z_5-(Z_3-X_{25})]$是枯枝落叶层露点处的水汽压；Z_3是气温；Z_5是空气露点；B_{154}是饱和空气的密度；B_{155}是饱和空气的定压热容量；B_{157}是水分汽化的潜热；B_{158}是湿度计常数；B_{159}是单位转换因子；B_{63}是枯枝落叶层表面的空气动力学导率。

(2) 饱和水汽压的 Teten 方程：

$$S_1(T_1)=B_{153}\exp\frac{B_{72}T_1}{T_1+B_{18}}$$

式中，S_1是饱和水蒸气压；T_1是温度；B_{18}和B_{72}是系数；B_{153}是0℃时的水蒸气压。

(3) 净新叶光合作用方程：

$$G_{24}=\frac{-B_{32}B_{33}G_{110}X_{10}T_1G_{102}}{B_{35}G_{49}G_{61}}$$

式中，G_{24}是净新叶光合作用率；T_1是光合作用表达式的对数部分；X_{10}是新叶碳含量；G_{49}是新叶的周平均气孔阻力；G_{61}是总的叶碳含量；G_{102}是温度对光合作用的影响项；G_{110}是周平均白昼长度；B_{32}是基于碳收支从实验结果外推的净新叶光合作用率的比值；B_{33}是净新叶光合作用的速率常数；B_{35}是叶片对短波辐射的衰减系数；$T_1=\ln\left[\frac{B_{34}+G_{109}\exp(-B_{36}G_{61})}{B_{34}+G_{109}}\right]$，$G_{109}$是周平均光合作用有效辐射，$B_{34}$是新叶光合作用率达到最大速率的一半时的光强。

光合生产力 Y 指数

李继由：西藏地区光合生产力估算。自然资源，1980，1

$$Y=KE\sum_{i=1}^{n}\frac{q_il_it_i}{LT}$$

式中，K为能量换算为产量的系数；E为生长盛期理论最大光能利用率；q_i为作物生育期间任一时刻的太阳总辐射能；l_i为i阶段的叶面积指数；t_i为i阶段的实际温度；T为光合作用最适温度；L为理想群体最大叶面积指数。

线性营养物循环模型

Harrison G W, Fekete S：营养物循环系统对流动速率扰动的阻力
Ecological Modelling, 1980, 10

$$\mathrm{d}x/\mathrm{d}t=Ax+z$$

式中，x是每个区室中的营养物浓度向量；z是从系统外部的流入率向量；矩阵$A=[a_{ij}]$的非对角线元素是区室之间特定的流动速率，也就是说对于$i\neq j$的$a_{ij}x_j$是从区室j到区室i的流动速率；对角线元素可表达为$a_{jj}=-a_{0j}-\sum\limits_{i\neq j}a_{ij}$，$a_{0j}x_j$是从区室$j$流出到系统外的外流速率，如果至少有一个$a_{0j}$是非零值，那么 A 就不是单值的，均衡浓度$x^*$的向量为$x^*=-A^{-1}z$；如果为了方便起见，可假定在时间$t$=0时发生扰动，则被扰动系统的动力学可表达如下：

$$\mathrm{d}x/\mathrm{d}t=(A+\Delta A)x+z+\Delta z\qquad x(0)=x^*$$

扰动轨迹离开初始状态的位移为：

$$\Delta x(t)=x(t)-x^*$$

其解为：

$$\Delta x(t)=\{I-\exp[(A+\Delta A)t]\}\Delta x^*$$

式中，$(A+\Delta A)\Delta x^*=-\Delta Ax^*+\Delta z$。

相似系数模型

阳含熙：相似系数的探讨。自然资源，1980，1

(1) 相关系数r_{ab}模型：

$$r_{ab}=\frac{\sum\limits_h(x_{ah}-\bar{x}_a)(x_{bh}-\bar{x}_b)}{\sqrt{\sum\limits_h(x_{ah}-\bar{x}_a)^2\sum\limits_h(x_{bh}-\bar{x}_b)^2}}$$

$$(h=1,2,\cdots,p)$$

(2) 距离函数：

1) 欧氏距离 $E(a,b)$模型：

$$E(a,b)=\left[\sum_h(x_{ha}-x_{hb})^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$(h=1,2,\cdots,p)$$

2) 弦距离 $C(a,b)$模型：

$$C(a,b)=\left[2\left(1-Q_{ab}/\sqrt{Q_{aa}Q_{bb}}\right)\right]^{\frac{1}{2}}$$

3) 斜距离 $O(a,b)$模型：

$$O_{(a,b)}=\left[\sum_h(x_{ha}-x_{hb})^2+2\sum_h\sum_h(x_{ha}-x_{hb})(x_{ia}-x_{ib})S_{hi}\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$S_{hi}=\frac{\sum_{a}(x_{ha}-\bar{x}_h)(x_{ia}-\bar{x}_i)}{\left[\sum_{a}(x_{ha}-\bar{x}_h)^2(x_{ia}-\bar{x}_i)^2\right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$(a=1,2,\cdots,n)$$

$$(h,i=1,2,\cdots,p)$$

式中，S_{hi} 为相关系数。

4) 广义平均距离 $M(a,b)$ 模型：

$$M(a,b)=\left[(x_a-x_b)'S^{-1}(x_a-x_b)\right]^{\frac{1}{2}}$$

5) Gower 距离 $W(a,b)$ 模型：

$$W(a,b)=\sum_{h}|x_{ha}-x_{hb}|\Big/\text{极差}$$

$$(h=1,2,\cdots,p)$$

6) Bray 和 Curtis 距离 $B(a,b)$ 模型：

$$B(a,b)=\frac{\sum_{h}|x_{ha}-x_{hb}|}{\sum(x_{ha}+x_{hb})}$$

$$(h=1,2,\cdots,p)$$

7) Canberra 距离 $C(a,b)$ 模型：

$$C(a,b)=\sum_{h}\frac{|x_{ha}-x_{hb}|}{x_{ha}+x_{hb}}$$

$$(h=1,2,\cdots,p)$$

(3) 信息函数——信息量 I 模型：

1) 不对称情况下：

$$I=N\ln N-\sum_{j=1}^{s}a_j\ln a_j$$

2) 对称情况下：

$$I=SN\ln N-\sum_{j=1}^{s}\left[a_j\ln a_j+(n-a_j)\ln(n-a_j)\right]$$

森林生态系统的能量流动模型

贺庆棠：森林生态系统的能量流动，自然资源，1980，3

(1) 森林生态系统能量平衡方程：

$$R_0=LE_0+V_0+B_0+IA_0$$

或

$$Q(1-\alpha_0)-\varepsilon_0=LE_0+B_0+V_0+r+m+n+p+q$$

(2) 森林生态系统中森林植物层的能量平衡方程：

$$R_k=LE_k+V_k+B_k+IA_0$$

或

$$Q(1-\alpha_0)[1-\beta(1-\alpha_s)]-\varepsilon_k=$$
$$LE_k+B_k+V_k+r+m+n+p+q$$

有蹄类动物系统的最优模型

Stocher M：狼——有蹄类动物系统的最优模型，Ecological Modelling，1981，12

(1) 捕食动力学：

每年兽仔 C 出生的数量：

$$C=M\bar{b}$$

式中，M 是总的驼鹿数量；$\bar{b}$ 是每种动物的加权平均出生率。

(2) 狼群动力学：

对于任何被捕食者密度的均衡领地的大小利用下面的关系式来估算：

$$T=(T_{\max})/(1+0.001B)$$

式中，T 是每个狼群的均衡领地大小；$T_{\max}$ 是最大的领地大小；B 是有蹄类动物被捕食者的生物量。

模型使用一个修正了的多物种方程估算狼群对被捕食者密度短期的函数响应：

$$NA_i=AN_i/F\left(1+A\sum_{j}th_jN_j\right)$$

式中，NA_i 是每月被杀死的被捕食者种类 i 的数量；N_i 是被捕食者种类 i 的密度；th_j 是种类 j 中被杀死的每个被捕食者的处理时间；A 是狼群搜索效率参数；F 是搜索覆盖到的全部的狼群领地。

(3) 最优化程序：

管理的目标是将经过任意一段规划周期 T 后的每年收益期望值最大化：

$$V_t=\sum_{t}^{T}R_t$$

式中，V_t 是从 t 到 T 的总收益；R_t 是每年的收益。

(4) 每年的收益为：

$$R_t=H_t-c_wP_t$$

式中，H_t 是驼鹿的收获量；P_t 是每年狼群控制计划所除掉的狼群总数；c_w 是每平方英里相对于驼鹿收获量的每个狼群被除掉时狼群控制计划的相对成本

生态系统中流的分解与能量最小损耗原理

朱振海、马世骏：生态系统中流的分解与能量最小损耗原理　生态学报，1981，1(2)

（1）生态系统的质量平衡方程：

1）质量平衡方程：

$$\frac{dx_0}{dt}=\sum_{i=1}^{5}\rho_i x_i+\lambda_{60}x_6-\lambda_0 x_0-px_1$$

$$\frac{dx_1}{dt}=(p+g+r-\tau_{12}-\mu_{15}-\rho_{10}-\lambda_{16})x_1$$

$$\frac{dx_2}{dt}=\tau_{12}x_1-(\tau_{23}+\mu_{25}+\rho_{20}-\lambda_{26})x_2$$

$$\frac{dx_3}{dt}=\tau_{23}x_2-(\tau_{34}+\mu_{35}+\rho_{30}-\lambda_{36})x_3$$

$$\frac{dx_4}{dt}=\tau_{34}x_3-(\mu_{45}+\rho_{40}+\lambda_{46})x_4$$

$$\frac{dx_5}{dt}=\sum_{i=1}^{4}\mu_{i5}x_i+\lambda_{65}x_6-\lambda_{56}x_5-\rho_{50}x_5-gx_1$$

$$\frac{dx}{dt}=\sum_{i=0}^{5}\frac{dx_i}{dt}=rx_1+\lambda_{60}x_6+\lambda_{65}x_6-\sum_{i=0}^{5}\lambda_{i6}x_i=$$

$$(p-g+r)x_1-\sum_{i=1}^{4}(\rho_{i0}+\mu_{i5}+\lambda_{i6})x_i+\frac{dx_0}{dt}+\frac{dx_5}{dt}$$

2）熵平衡方程：

$$\frac{dx_0}{dt}=\sum_{i=1}^{5}\rho_i x_i+\lambda_{60}x_6-\lambda_0 x_0-px_1$$

$$\frac{dx_1}{dt}=(p+g+r-\tau_{12}-\mu_{15}-\rho_{10}-\lambda_{16})x_1$$

$$\frac{dx_2}{dt}=\tau_{12}x_1-(\tau_{23}+\mu_{25}+\rho_{20}+\lambda_{26})x_2$$

$$\frac{dx_3}{dt}=\tau_{23}x_2-(\tau_{34}+\mu_{35}+\rho_{30}+\lambda_{36})x_3$$

$$\frac{dx_4}{dt}=\tau_{34}x_3-(\mu_{45}+\rho_{40}+\lambda_{46})x_4$$

$$\frac{dx_5}{dt}=\sum_{i=1}^{4}\mu_{i5}x_i+\lambda_{65}x_6-\lambda_{56}x_5-\rho_{50}x_5-gx_1$$

$$\frac{dx}{dt}=\sum_{i=0}^{5}\frac{dx_i}{dt}=rx_1+\lambda_{60}x_6+\lambda_{65}x_6-\sum_{i=0}^{5}\lambda_{i6}x_i=$$

$$(p+g+r)x_1-\sum_{i=1}^{4}(\rho_{i0}+\mu_{i5}+\lambda_{i6})x_i+\frac{dx_0}{dt}+\frac{dx_5}{dt}$$

式中，ω 为化学势；T 为绝对温度。

（2）生态系统的最小耗能原理：

生态系统的熵变模型：

$$ds=d_i s+d_e s$$

式中，$d_i s$ 为系统的熵产生，是系统内部的不可逆过程所引起的熵变化；$d_e s$ 为熵流，是生态系统与环境进行物质与能量交换引起的熵变化。当 $ds=0$ 时，系统处于稳定状态；如果 $ds\neq 0$ 时，不论大于零或小于零，系统都要发生演变。

灵敏度分析模型

Gardner R H, O'Neill R V, Mankin J B et al：基于一个溪流生态系统模型的灵敏度分析和误差分析的比较　Ecological Modelling, 1981, 12

（1）为了描述灵敏度方程，考虑一个由下面的方程描述的系统：

$$\frac{dx_i}{dt}=f_i(\alpha_1,\alpha_2,\cdots,\alpha_m,x_1,x_2,\cdots,x_n)$$

$$(x_i(t_0)=x_i^0,\ i=1,2,\cdots,n)$$

式中，$x_1,x_2,\cdots,x_n$ 是状态变量集合；α_i 是参数集合。

（2）灵敏度方程：

$$\frac{\partial}{\partial\alpha_j}\frac{dx_i}{dt}=\frac{\partial f_i(\alpha_1,\alpha_2,\cdots,\alpha_m,x_1,x_2,\cdots,x_n)}{\partial\alpha_j}$$

$$\frac{\partial x_i(t_0)}{\partial\alpha_j}=\frac{\partial x_i^0}{\partial\alpha_j}=0\qquad(i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m)$$

（3）它能被重写为：

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial x_i}{\partial\alpha_j}=\frac{\partial f_i}{\partial\alpha_j}+\sum_{k=1}^{n}\frac{\partial f_i}{\partial x_k}\frac{\partial x_k}{\partial\alpha_j}$$

$$\frac{\partial x_i(t_0)}{\partial\alpha_j}=0.$$

$$(i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m)$$

一年生植物竞争模型

Weiner J, Conte P T：一年生植物竞争模型中的扩散和邻近影响　Ecological Modelling, 1981, 13

（1）在一年生植物的研究中，繁殖产量仅仅是种子生产，其计算可表达为：

$$R = R_{\max} \bigg/ \left(1 + \sum_{i=1}^{p} D_i \sum_{k=1}^{s} C_k N_{ik} \right)$$

式中，R 是个体的繁殖产量；$R_{\max}$ 是在相同的非生物条件下没有相邻群体时的繁殖产量；D_i 是第 i 个相邻群体的影响；C_k 是第 k 个物种的影响；N_k 是在相邻群体 i 中物种 k 的个体的数量；p 是相邻群体的数量；s 是物种的数量。

(2) 种子之间的竞争仅仅发生在直接相邻的群体之间，W_j 的概率是指竞争者物种数量的总影响：

$$W_j = \sum_{k=1}^{s} C_{jk} N_k - C_{jj}$$

式中，C_{jk} 是物种 k 的种子对物种 j 的种子的影响；N_k 是一个单元中物种 k 的种子数量；s 是当前物种的数量；因为植物不与自己竞争，所以要减去 C_{jj} 项。

(3) 存活到成年期 R_j 的物种 j 的个体是双值函数：

$$R_j = \frac{K_j}{1 + W_j}$$

式中，K_j 是在没有竞争时，物种 j 的一粒种子存活的概率。

(4) 在一个单元中，物种 j 存活到成体阶段的种子的期望数量：

$$N(x_{\text{seeds}})_j R_j = N(x_{\text{aduts}})_j$$

除了某个单元周围的其他单元的竞争也要考虑进去之外，成体也以相似的方式竞争。成体竞争的总影响方程为：

$$W_j = \sum_{i=1}^{p} D_i \sum_{k=1}^{s} C_{jk} N_{ik} - D_i C_{jj}$$

式中，C_{jk}、N_{ik} 和 s 是成体对于种子相同值的等价值；D_i 是相邻个体 i 的影响；p 是相邻个体的数量。

复杂生态系统模型

Gentil S, Blake G：复杂生态系统模型的有效性，Ecological Modelling, 1981, 14

(1) 基于离散模型的每个标准输出值的差异的二次方判别式：

$$C = \sum_{k=0}^{T} [Y(p,k) - Y_M(k)]^T W [Y(p,k) - Y_M(k)]$$

式中，$Y(p,k)$ 是输出向量；$Y_M(k)$ 是在时间 k 的测量向量；T 是数据点的数量；W 是一个评估矩阵，它反映了每个数据的可信度。

(2) 最优参数的协方差矩阵 Γ_p 表达式：

$$\Gamma_p = \sigma^2 S^{-1}$$

式中，σ^2 是对应于以 W 为单位的组分 $Y(p,k)$ 的测量噪音的变化；S 是判别式的灵敏度矩阵，可表达为 $S = \sum_{k=0}^{T} \frac{\partial Y(p,k)}{\partial p} W \frac{\partial Y(p,k)^T}{\partial p}$。

生境适宜性指数的计算模型

Bosserman R W, Ragade R K：利用模糊集合论进行生态系统分析，Ecological Modelling, 1982, 16

(1) 种 i 的生境适宜性指数 s_i 可用兼容性指数向量 V 的加权函数来计算：

$$s_i = f(w_1 s_1, w_2 s_2, \cdots, w_m s_m)$$

(2) 对红尾雁来说，用 USFWS 来表示的函数为：

$$s_1 = \frac{1}{5} \left\{ (V_1 V_2 V_3)^{1/3} + V_4 + V_5 + V_6 + [(V_7 V_9 V_{10})^{1/3} + 2V_8]^{1/3} \right\}$$

(3) 对松鼠而言，其函数为：

$$s_2 = \frac{1}{4} [(V_1 V_2^2)^{1/3} + V_3 + V_4 + V_5]$$

典型生态系统中的符号稳定性定义模型

Logofet D O, Ulianov N B：典型生态系统中的符号稳定性——符号稳定性模式的完全分类，Ecological Modelling, 1982, 16

(1) 符号稳定性的定义：

物种内部和物种之间关系的模式通过系统的群落矩阵 A 的符号模式 S 来表示：

$$S = \operatorname{sign} A = \|\operatorname{sign} a_{ij}\|$$

式中，$\operatorname{sign} a_{ij} = \begin{cases} + & (a_{ij} > 0) \\ 0 & (a_{ij} = 0) \\ - & (a_{ij} < 0) \end{cases}$。

众所周知，一个群落中的两个物种 i 和 j 之间相互作用的分类依赖于对称元素 a_{ij} 的符号对：++ 表示互利共生；+ - 表示捕食和被捕食的关系；- - 表示竞争；+0 表示共栖；-0 表示分居；00 表示中立。

假定对于任意的 i 和 j，矩阵 $B = \|b_{ij}\|$ $(i,j=1,\cdots,n)$ 等于矩阵 A，即 $\operatorname{sign} b_{ij} = \operatorname{sign} a_{ij}$，则矩阵 A 称为符号

稳定(或者性质上的稳定)；如果 A 是稳定的，则任何等于 A 的矩阵 B 也是稳定的。

(2) 符号稳定的必要条件：

Quirk 和 Ruppert (1965)提出了下面的不可分解矩阵 $A=\|a_{ij}\|$ 的符号稳定的条件：

情况 1：对于所有 i，$a_{ii}\leqslant 0$，则对于某些 k，有 $a_{kk}<0$；情况 2：对于任意的 $i\neq j$，则有 $a_{ij}a_{ji}\leqslant 0$；情况 3：对于三个或更多指数 $i_1\neq i_2\neq\cdots\neq i_k$ $(k\geqslant 3)$ 的补集，则产物 $a_{i_1i_2}a_{i_2i_3}\cdots a_{i_ki_1}=0$；情况 4：在 det(A) 的展开式中，存在一个非零项。

复杂生态系统达到稳定平衡时的物种数量测定模型

Kindlmann P, Rejmánek M：复杂模型生态系统达到稳定平衡时的物种数量. Ecological Modelling, 1982, 16

(1) 含有 n 个物种的生态模型系统：

$$\mathrm{d}x_i/\mathrm{d}t=x_i\left(r_i+\sum_{j=1}^{n}a_{ij}x_j\right)$$

$$(i=1,2,\cdots,n)$$

式中，t 是时间；x_i 是第 i 物种的种群密度；r_i 是内部增长率；a_{ij} 是表示第 j 物种对第 i 物种的影响的相互作用系数；矩阵 $A=(a_{ij})_{i,j=1}^{n}$ 被称为相互作用矩阵。

(2) 如果仅仅存在 k 个物种，$k<n$，则有：

$$\mathrm{d}x_i/\mathrm{d}t=x_i\left(\rho_i+\sum_{j=1}^{k}\alpha_{ij}x_j\right)$$

$$(x_i>0, i=1,2,\cdots,k)$$

$$(x_i=0, i=k+1,k+2,\cdots,n)$$

式中，ρ_i 和 α_{ij} 以明显的方式从初始集合 r_i 和 a_{ij} 中选出。

(3) 相互作用矩阵为：

$$A_k=(\alpha_{ij})_{i,j=1}^{k}$$

(4) Manton (1979) 已经证明当存在 k 个物种时均衡时的数量为：

$$E_n(k)=2^{-k}\binom{n}{k}$$

(5) 当存在 k 个物种时，局部稳定平衡时的预期数量为：

$$S_n(k)=2^{-k}\binom{n}{k}p(k)$$

式中，$p(k)$是(2)式整体平衡时达到局部稳定的概率

能量和熵平衡的初级生产量、呼吸作用和放牧速率模型

Mauersberger P：根据能量和熵平衡的初级生产量、呼吸作用和放牧速率. Ecological Modelling, 1982, 17

(1) 生态系统熵的平衡方程：

$$\partial\rho s/\partial t+\mathrm{div}\,\boldsymbol{S}=\sigma=\sum_i Y_iX_i$$

式中，ρ 是质量密度；s 是比熵；$\boldsymbol{S}$ 是熵流密度；σ 是局部熵产出，它是一个由广义通量和压力(Y_i 和 X_i)组成的双线性函数，根据热力学第二定律，$\sigma>0$，这表明第 k 种生物的初级生产速率 P_k 在接下来的过程中依赖于驱动力 $\Phi_k(T,I)A_{P,k}/(R_0T)$。

$$P_k=P_k^{\max}\{1-\exp[-c_k\Phi_k(T,I)A_{P,k}/(R_0T)]\}$$

式中，$\Phi_k(T,I)$ 是描述光温对酶的催化过程的依赖的函数；T 和 I 是依赖于时间和空间的水温和光照强度；$A_{P,k}$ 是指第 k 种生物在一定温度、营养浓度、氧气饱和度、生物量和压力的情况下的初级生产亲合力，它是时间和空间的函数；R_0 是通用气体常数。

(2) 第 k 种生物的呼吸作用速率为：

$$R_k=R_k^{(0)}\{\exp[c_k\Psi_k(T,I)A_{R,k}/(R_0T)]-1\}$$

式中，$\Psi_k(T,I)$ 是表现对温度和光照强度依赖的函数，$A_{R,k}$ 是呼吸作用的亲合力。

(3) 放牧速率 G_l 与放牧亲合力 $A_{G,k}$ 之间的关系可用下式表式：

$$G_l=G_l^{\max}\{1-\exp[-C_lA_{G,l}/(R_0T)]\}$$

式中，系数 C_l 既决定于食肉动物的食物中不同的被掠食者的组成，也决定于食肉动物的排泄物数量。

(4) 速率对生物量和环境因素的依赖：

$$P_k=P_k^{\max}[1-(B_k/B_k^{\max})^{c_k\Phi_k(T,I)}]$$

$$R_k=R_k^{(0)}[(B_k/B_k^{\min})^{c_k\Psi_k(T,I)}-1]$$

$$G_l=G_l^{\max}[1-(B_k/B_{G,l}^{\max})^{C_l}]$$

式中，B_k 表示第 k 种生物的生物量的质量分率。

群落系数 CC

王伯荪，张志权，蓝崇钰等：南亚热带常绿阔叶林取样技术研究　植物生态学与地植物学丛刊，1982，6(1)

$$CC = \frac{2n_c}{n_1 + n_2} \times 100$$

式中，n_c 为两群落的共有种数；n_1 和 n_2 为群落 1 和群落 2 各自拥有的种数。

群落多样性和相似性指数

吴亚，金翠霞：高寒草甸土壤生态系统的结构及昆虫群落的某些特性　生态学报，1982，2(2)

(1) 群落的多样性指数 H' 模型：

$$H' = -\sum_{i=1}^{s} p_i \ln p_i$$

式中，s 为所有种类数；p_i 为第 i 种的个体数百分比。

(2) 群落之间的相似性指数 I 模型：

$$I = \frac{2c}{2ab - (a+b)c}$$

式中，a 为 A 生境的种类数；b 为 B 生境的种类数；c 为 A，B 两生境共同的种类数。

柏达木种群在单位面积内的光和产量 $P_{总}$ 模型

林鹏，郑元球，何景：自然群落中柏达木种群光合产量与光强气温关系的初步研究　生态学报，1982，2(3)

$$P_{总} = \int_0^F \frac{AbI_0 \exp(-KF)}{A + qI_0 \exp(-KF)} \mathrm{d}F$$

$$= \frac{A}{K} \ln \frac{A+b}{A + bI_0 \exp(-KF)}$$

式中，A，b，K 为常数；F 为叶面积指数；I_0 为入射光强度。

叶面积的测定与群落中光照分布模型

冯宗炜，陈楚莹，张家武等：湖南省会同县两个森林群落的生物生产力　植物生态学与地植物学丛刊，1982，6(4)

(1) 针叶面积 S 模型：

$$S = \frac{\pi}{2} l(d + d_1) + 2dl$$

式中，l 为针叶长度；d 为针叶平坦面宽度；d_1 为与平坦面垂直的厚度。

(2) 水平光照强度模型：

$$I = I_0 e^{-KF}$$

式中，I_0 为植物群落上方水平光照强度；I 为植物群落内一定高度的水平光照强度；e 为自然对数的底数；F 为植物群落自最上层至一定高度的叶面积指数(累积叶面积指数)；K 为消光系数。

CO_2 增长响应模型

Dahlman R C：对 CO_2 丰富度的响应预测的需求模拟——植物、群落和生态系统。Ecological Modelling, 1985, 29

$$R = \frac{R_{max}[CO_2]}{[CO_2] + K_m} + R_{int}$$

式中，R 描述了 CO_2 的增长响应(例如光合作用、生物量、产量)；R_{max} 是 R 的最大值；K_m 是 R 最大值的一半；R_{int} 是参数。

杰卡特指数的斯帕茨定量修正值

张绅：浙江省亚热带常绿阔叶林群落分类中的数学手段　植物生态学与地植物学丛刊，1983，7(4)

斯帕茨的相似性指数 IS_{sp} 模型：

$$IS_{sp} = \frac{\sum(M_w : M_g)}{a+b+c} \frac{M_c}{M_a + M_b + M_c} \times 100$$

式中，M_a 和 M_b 分别为仅限于在第一、二个样地中种的生物量总数；M_c 为两个样地中共有种的生物量总数；M_w 和 M_g 分别为两个样地中共有种的较小和较大生物量；a 和 b 分别为第一和第二个样地中独有的种数；c 为两个样地中共有的种数。

低分辨率生态系统模型

Caprariis P D：论低分辨率生态系统模型的充分性。Ecological Modelling, 1983/1984, 21

(1) 系统的控制方程：

$$\frac{\mathrm{d}x_i}{\mathrm{d}t} = u_i(x_i, y_i)$$

$$\frac{\mathrm{d}y_i}{\mathrm{d}t} = v_i(x_i, y_i)$$

$$(\tau_x \ll \tau_y)$$

式中，x_i 是指快速变量；y_i 是指慢速变量；τ_x 和 τ_y 分别是指 x_i 和 y_i 的时间尺度特征。

(2) 短周期现象：

由于 y_i 相对于 x_i 的变化速率太小，因此可以用一个常数项来代替 y_i：

$$\frac{dx_i}{dt} = u_i^*(x_i) + c$$

式中，c 是一个常数。

(3) 长周期现象：

$$\frac{dy_i}{dt} = \lambda_1[f(t) - x(t)]y - \lambda_2 x(t) y^2$$

式中，λ_1 和 λ_2 是生物学意义上的参数的结合，如吸气和呼气的频率；$x(t)$代表快速变量的时间变化；$f(t)$代表慢速变量外来填充的时间变化。

(4) 定义一个新的因变量：$z = y^{-1}$，则解决方案为：

$$z(t) = \lambda_2 \exp\left\{-\lambda_1 \int [f(s) - x(s)]ds\right\} \times$$
$$\int x(s) \exp\left\{\lambda_1 \int [f(s) - x(s)]ds\right\} ds +$$
$$k \exp\left\{-\lambda_1 \int [f(s) - x(s)]ds\right\}$$

如果$f(t)$和$x(t)$是常数或者它们的作用变化缓慢，则这个表达式可以简化为：

$$z(t) \to \frac{\lambda_2 x}{\lambda_1 (f - x)} \qquad (t \to \tau_y)$$

y 的渐近值为：

$$y(t) \approx \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\left(\frac{f}{x} - 1\right) \qquad (t \approx \tau_y)$$

有机物质和氮的动态交互作用模型

Logofe D O, Alexandrov G A：中度营养的沼泽生态系统的物质循环模型——Ⅱ动力学模型与生态演替 Ecological Modelling, 1983/1984, 21

$$\dot{C}_1 = -O_C C_1^2 / N_1 + A_C C_1$$

$$\dot{N}_1 = -O_N C_1 + (1 - c) D_N N_2^2 / C_2 + A_N$$

$$\dot{C}_2 = -O_C C_1^2 / N_1 - D_C N_2 - f_C C_2 - T_C C_2 + V_C$$

$$\dot{N}_2 = O_N C_1 - D_N N_2^2 / C_2 - T_N N_2 + V_N$$

式中，C_1 是活有机物(LOM)的植物量；N_1 是活有机物中的氮；C_2 是死有机物(DOM)的生物量；N_2 是死有机物中的氮；O_C 是树叶降落的速率；A_C 是 C_1 的同化速度；O_N 是随着树叶降落 N_1 的输出速率；D_N 是氮的吸入速度；A_N 是 N_1 从环境中输入的量；D_C 是中生物量的分解速率；f_C 是通过径流的 C_2 的输出率；T_C 是 C_2 的泥碳形成速率；V_C 是通过径流的 C_2 的输入率；T_N 是 N_2 的泥碳形成速率；V_N 是通过径流和沉淀作用 N_2 的输入率。

间作农业生态系统的生态学方法

Vandermeer J, Ambrose R, Hansen M et al：一种设计间作农业生态系统的生态学方法——在密歇根州南部地区大豆和番茄的间作系统 Ecological Modelling, 1984, 25

(1) 一个植物种群的产量-密度关系：

$$w^\theta = \frac{1}{A + BD}$$

式中，w 是一个植物个体的生物量产量；D 是种群密度；常数 A，B 和 θ 指各种生物学函数。

种群的整体产量为：

$$Y = wD = \frac{D}{(A + BD)^{1/\theta}}$$

竞争影响的强度为：

$$\sum_{i=1}^{N} \alpha w_i$$

式中，α 是竞争者一个单位生物量所引起的生物量的减少量（竞争系数）；w_i 是种群中第 i 个体的生物量；N 是与研究的个体进行竞争的个体数量。

(2) 两个植物物种相互作用模型：

$$Y_1 = \left(\frac{k_1 - G_1 D_2}{1 + B_1 D_1 + B_2 D_2 + C D_1 D_2}\right)^{\psi} D_1$$

$$Y_2 = \left(\frac{k_2 - G_2 D_1}{1 + B_1 D_1 + B_2 D_2 + C D_1 D_2}\right)^{\psi} D_2$$

式中，Y_1 和 Y_2 是两个物种的整个种群的果实产量；D_1 和 D_2 分别是两个物种的种群密度；k_1，k_2，G_1，G_2，B_1，B_2 和 C 是参数。

(3) 总相对值（R_{VT}）：

R_{VT} 是间作值和最大单作值的比率：

$$R_{VT} = \frac{P_1 y_1 + P_2 y_2}{P_1 M_1}$$

式中，P_i 是间作系统中第 i 农作物的货币价值；y_i 是间作系统中第 i 农作物的产量；M_i 是单作系统中第 i 农作物的产量；农作物 1 是两个农作物中价值较大的那个。

植物-有蹄类动物系统动态模型

Stocher M, Walters C J：植物-有蹄类动物系统的动力学及其最优利用．Ecological Modelling，1984，25

（1）植物-有蹄类动物系统动态：

$$V_{t+1}=V_t-G(V_t)-c_1N_t(1-e^{-d_1V_t})$$

$$N_{t+1}=N_t+N_t[-a_2+c_2(1-e^{-d_2V_t})]$$

式中，V_t是在年份t有蹄类动物可以作为食物的植物生物量；$G(V_t)$是植物生长函数；c_1是每只鹿消费植物的最大速率；d_1是当植被密度较低时鹿的放牧效率；N_t是在年份t有蹄类动物种群的大小；a_2是植物缺乏时的死亡率；c_2是植物生物量较高时的最大生育力；d_2是有蹄类动物种群在低植物生物量时的繁殖能力。

（2）信息值：

$$VI=\sum_{i=1}^{50}(H_i\mid P_0)-\sum_{i=1}^{50}(H_i\mid P_A)$$

式中，VI是每个50年期间有蹄类动物利润的信息值；H是每年的收获量(每年有蹄类动物的数量)；P_0是最优反馈策略；P_A是可供选择的收获策略；$H\mid P$表示当使用策略P时的收获量。

集中结构的最优控制模型

Bakule L, Straškraba M：多物种生态系统中的最优化．Ecological Modelling，1984，26

$$I=\int_{t_0}^{t_f}(c_1x_5^2+c_2x_6^2+c_3u_3^2+c_4u_4^2+c_5u_5^2)\mathrm{d}t$$

$$=\int_{t_0}^{t_f}f^0(x,u,t)\mathrm{d}t\to\min$$

此方程遵从于：

$$\dot{x}_1=(a_1+a_3u_3)(a_2-\varepsilon_3u_4-x_1)-x_1x_2(a_5-a_6\varepsilon_1x_7)/(a_3+a_4\varepsilon_1x_7+x_1)+a_7x_2+a_8x_2\varepsilon_1x_7+a_9x_2\sin x_4+a_{10}x_2\varepsilon_1x_7\sin x_4$$

$$\dot{x}_2=x_2(-a_1-\varepsilon_3u_3)+x_1x_2(a_5+a_6\varepsilon_1x_7)/(a_3-a_4\varepsilon_1x_7+x_1)-x_2(a_7+a_8\varepsilon_1x_7)+a_9\sin x_4+a_{10}\varepsilon_1x_7\sin x_4-x_3(a_{11}+a_{12}\varepsilon_1x_7+\varepsilon_1u_5)$$

$$\dot{x}_3=x_2x_3(a_{11}+a_{12}\varepsilon_1x_7+\varepsilon_3u_5)-x_3a_{13}u^{\varepsilon_2a_{14}}$$

$$\dot{x}_4=1$$

$$\dot{x}_5=-\frac{\varepsilon_1}{x_2^2}$$

$$\dot{x}_6=-\frac{\varepsilon_2}{x_3^2}$$

$$\dot{x}_7=-\frac{\varepsilon_1}{x_8}$$

$$\dot{x}_8=u_1$$

$$x_2\leqslant k$$

式中，x_1是有限的营养物质；x_2是藻类；x_3是浮游动物；不等式对应于饮用水的质量要求；a_i和k是常数；u_j是输入量；$\varepsilon_k\in\{0,1\}$是模型简化常数；a_1是水流速率；a_2是流入的营养浓度；a_3是浮游动物死亡率；$f_1=a_5+a_6\varepsilon_1x_7$是藻类的最大生长率函数；$f_2=a_3+a_4\varepsilon_1x_7$是藻类的半饱和率函数；$f_3=a_7+a_8\varepsilon_1x_7+a_9\sin x_4+a_{10}\varepsilon_1x_7\sin x_4$是藻类呼吸作用和再矿化作用率函数；$f_3=a_{11}+a_{12}\varepsilon_1x_7+\varepsilon_3u_5$是浮游动物进食率函数；$u_1$是某一藻类细胞的体积；$u_2$是浮游动物物种的不同大小；$u_3$是水流速率的变化；$u_4$是净化作用引起的流入营养物质浓度的变化；$u_5$是浮游动物进食的变化。

生态系统的空间分布模型

牛文元：生态系统的空间分布．生态学报，1984，4(4)

（1）点的数目模型：

$$u_i=(M_s)_i\frac{n}{\sum_{k=1}^{n}(M_s)_i}$$

式中，u_i代表在第i个面积单元中，所选择的某个生态内容所应转化的点数；$(M_s)_i$表示在转换为点之前，第i个面积单元中所包含的该生态内容的实际状况；n代表在该地域中将要设计的总点数。

（2）距离模型：

$$D_a=\sum_{1}^{h}\sum_{\theta=1}^{\delta}\left\{[(d_{ij}+\Delta d)_{\min}]_{\theta(0,\pi/4,\pi/2,\cdots,(3\pi/2),(7\pi/4))}\times\frac{p_i}{1-p_i}\right\}$$

式中，p_i为在第i个含点面积单元所对应的概率值；$(d_{ij})_{\min}$表示在不同方位角θ时，最相邻接的那一对含点面积单元之间的距离；Δd为距离增量；h为该统一

网络中，能够构成最近邻接状况的总数目。

(3) E 尺度模型：

$$E=\frac{\sum_{1}^{h}\sum_{\theta=1}^{\delta}\left\{\left[(d_{ij}+\Delta d)_{\min}\right]_{\theta}\frac{p_i}{1-p_i}\right\}}{\frac{(D_a)_U}{2\sqrt{n/A}}}$$

式中，$(D_a)_U$ 为实际距离总和；A 为面积单元 a 与其数目的积；其他同上。

生态位重叠计测的改进模型

王刚：植物群落中生态位重叠的计测．植物生态学与地植物学丛刊，1984，8(4)

$$N.O.=\left[\sum_{i1}\cdots\sum_{in}\varphi(x_1^{i1},x_2^{i2},\cdots,x_n^{in})l_1^{i1},l_2^{i2},\cdots,l_n^{in}\right]\Big/$$
$$\left\{\max\left[\sum_{i1}\cdots\sum_{in}f_1(x_1^{i1},x_2^{i2},\cdots,x_n^{in})l_1^{i1},l_2^{i2},\cdots,l_n^{in},\right.\right.$$
$$\left.\left.\sum_{i1}\cdots\sum_{in}f_2(x_1^{i1},x_2^{i2},\cdots,x_n^{in})l_1^{i1},l_2^{i2},\cdots,l_n^{in}\right]\right\}$$

式中，l^i 为生态因子间隔。

树木生长方程

模拟卡罗莱纳州南部 Santee 河漫滩地区河流改道对滩区森林群落的影响．Ecological Modelling, 1985, 29

(1) Shugart 和 West 提出了树木在最佳状态下生长的方程：

$$\frac{\mathrm{d}D}{\mathrm{d}t}=\frac{GD(1-DH/D_{\max}H_{\max})}{274+3b_2D-4b_3D^2}$$

式中，D 是树的胸高直径；H 是树木的高度；$D_{\max}$ 和 $H_{\max}$ 分别是每一物种的直径和高度记录的最大值；G，b_2 和 b_3 是每一树种的生长率参数。

(2) 带修正函数的 FORFLO 生长方程为：

$$\frac{\mathrm{d}D}{\mathrm{d}t}=\frac{GD(1-DH/D_{\max}H_{\max})}{274+3b_2D-4b_3D^2}\times S(\mathrm{BAR})T(\mathrm{DEGD})r(\mathrm{AL})H(\mathrm{WTAB})$$

式中，S(BAR)是立地拥挤度的修正参数；T(DEGD)是温度因子；r(AL)是遮蔽容许量；H(TWAB)是物种对水的忍耐力。

敏感指数 S_i

李树人：森林与山区生态系统及其生产的关系．生态学杂志，1985，6

$$S_i=\frac{F_1(x_2-x_1)}{x_1(F_2-F_1)}$$

式中，x_1，x_2 分别为变化因子的初期值和后期值；F_1，F_2 分别为变化初期和变化后的森林覆被率。

草原生态系统模型

Shiyomi M, Akiyama T, Takahashi S：模拟草原生态系统中能量流动和转换效率．Ecological Modelling, 1986, 32

8 个不同的区室中能量积累的数量如下：①地上活体植物对食草动物的可用部分，V_1；②地上活体植物的不可用部分，V_2；③地下活体，包括根的部分，V_3；④直立的死亡植物物质，V_4；⑤土壤表面枯枝落叶，V_5；⑥食草动物吃掉的草原植物，V_6；⑦家畜的体重，V_7；⑧土壤表面的粪便，V_8。所有这些变量都随时间 t 而变化，其计算方程分别可表达为：

$$\dot{V}_1=f_{01}Q_0+f_{21}V_2+f_{31}V_3-(f_{12}+f_{14}+f_{19})V_1-F_{16}$$

$$\dot{V}_2=f_{02}Q_0+f_{12}V_1+f_{32}V_3-(f_{21}+f_{23}+f_{24}+f_{29})V_2$$

$$\dot{V}_3=f_{23}V_2-(f_{31}+f_{32}+f_{39}+f_{310})V_3$$

$$\dot{V}_4=f_{14}V_1+f_{24}V_2-f_{45}V_4$$

$$\dot{V}_5=f_{45}V_4-f_{510}V_5$$

$$\dot{V}_6=F_{16}$$

$$\dot{V}_7=f_{67}F_{16}h_1-f_{79}h_2$$

$$\dot{V}_8=f_{68}F_{16}-f_{810}V_8$$ （在给定草原上有家畜的情况下）

$$\dot{V}_8=-f_{810}V_8$$ （在给定草原上没有家畜的情况下）

式中，f_{ij} 表示变量 i 到 j 的能量流动速率；f_{i9} 是第 i 区室由于植物呼吸作用的能量损失系数；f_{i10} 是从第 i 区室到土壤的能量流动系数。

Lotka-Volterra 模型

Takeuchi Y, Adachi N：生态模型的动态性和稳定性．Ecological Modelling, 1986, 32

(1) 双物种竞争系统：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{pmatrix}x_1(t)\\x_2(t)\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}x_1(t)[1-x_1(t)-\alpha x_2(t)]\\x_2(t)[1-\beta x_1(t)-x_2(t)]\end{pmatrix}$$

(2) 两个被捕食者—一个捕食者系统：

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix}x_1(t)\\x_2(t)\\y(t)\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}x_1(t)[1-x_1(t)-\alpha x_2(t)-\varepsilon y(t)]\\x_2(t)[1-\beta x_1(t)-x_2(t)-\mu y(t)]\\y(t)[-1+d\varepsilon x_1(t)+d\mu x_2(t)]\end{pmatrix}$$

(3) 两个被捕食者-两个捕食者系统：

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix}x_1(t)\\x_2(t)\\y_1(t)\\y_2(t)\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}x_1(t)[1-x_1(t)-\alpha x_2(t)-\varepsilon_1 y_1(t)-\varepsilon_2 y_2(t)]\\x_2(t)[1-\beta x_1(t)-x_2(t)-\mu_1 y_1(t)-\mu_2 y_2(t)]\\y_1(t)[-1+d\varepsilon_1 x_1(t)+d\mu_1 x_2(t)]\\y_2(t)[-1+d\varepsilon_2 x_1(t)+d\mu_2 x_2(t)]\end{pmatrix}$$

(4) 三物种竞争系统：

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix}x_1(t)\\x_2(t)\\x_3(t)\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}x_1(t)[1-x_1(t)-\alpha x_2(t)]\\x_2(t)[1-\beta x_1(t)-x_2(t)-\beta x_3(t)]\\x_3(t)[1-\alpha x_2(t)-x_3(t)]\end{pmatrix}$$

(5) 三个被捕食者-一个捕食者系统：

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix}x_1(t)\\x_2(t)\\x_3(t)\\y(t)\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}x_1(t)[1-x_1(t)-\alpha x_2(t)-\varepsilon_1 y(t)]\\x_2(t)[1-\beta x_1(t)-x_2(t)-\beta_1 x_3(t)-\varepsilon_2 y(t)]\\x_3(t)[1-\alpha x_2(t)-x_3(t)-\varepsilon_3 y(t)]\\y(t)[-1+d\varepsilon_1 x_1(t)+d\varepsilon_2 x_2(t)+d\varepsilon_3 x_3(t)]\end{pmatrix}$$

式中，$x_i(t)$ $(i=1,2,3)$ 和 $y_i(t)$ $(i=1,2)$ 分别是被捕食者和捕食者的种群规模；正参数α 和β 表示被捕食者之间的竞争作用；负参数ε_i 和μ_i 是被捕食者由于被捕食而减少的系数；$d>0$ 是捕食者的转换率。

植被规模分布动态模型

Takada T, Iwasa Y：遮蔽的相互影响下植被的规模分布动力学. Ecological Modelling, 1986, 33

(1) 模型：

假定一个植物种群在同质的区域内生长，在时间t每单位面积的个体的数量用$n(W,t)\mathrm{d}W$表示，W是个体的重量，个体的生长率和死亡率分别用v和M表示，调整$n(W,t)$动力学的基本方程通过 von Forester 方程给出：

$$\frac{\partial n}{\partial t}=-\frac{\partial}{\partial W}(v\cdot n)-M\cdot n$$

假定群落中的每种植物被相邻区域S的更大植物遮蔽，本区域相邻的比W更大的植物总数为：

$$N(W,t)=S\int_W^{K_0}n(W',t)\mathrm{d}W'$$

式中，$N(W,t)$是规模等级；K_0是没有遮蔽的条件下，植被的最大规模。

生长率v的计算公式为：

$$v(W,N)=rW\left(1-\frac{1+AN}{K_0}W\right)$$

式中，r是生长系数；A是指感受性。

(2) 没有死亡的案例分析：

稳定状态下的规模等级：

$$N(W,\infty)=\frac{K_0}{AW}-\frac{1}{A}$$

规模频数分布定义为：

$$f(W,t)=n(W,t)\Big/\int_0^{K_0}n(W,t)\mathrm{d}W$$

稳定状态的分布：

当$\dfrac{K_0}{1+ASD}<W<K_0$时：

$$f(W,\infty)=-\frac{K_0}{ASDW^2}$$

式中，$D=\int_0^{K_0}n(W)\mathrm{d}t$。

生态系统主要组分的状态指数动态模型

王正非，陈大我，刘自强：论生态平衡和林火烈度. 植物生态学与地植物学学报，1986，10(1)

$$\frac{\mathrm{d}E_b}{\mathrm{d}t}=-C\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}$$

式中，E_b为生态系统主要组分的状态指数；C为抗火系数；u为热能密度。

一致性系数

郑慧莹，李建东：应用定量方法研究草原群落分类的初步探讨. 植物生态学与地植物学学报，1986，10(1)

$$CH=bH\frac{1}{1+forc}$$

$$bH=\frac{1}{d}\sum_{j=1}^{l}C_j$$

$$forc=\frac{0.5(e-g)}{d}$$

式中，CH为校正后的一致性系数；bH为一致性基本系数；$forc$为校正因素；C_j为存在度≥41%的植物

种的存在度；d 为样方的平均种数；l 为存在度 ≥41% 的种数；e 为种类最丰富的样地的种数；g 为种类最贫乏的样地的种数

能量品质因数 Q

许洪昌：生态系统中的信息 生态学杂志，1986，5(2)

$$Q = k(I_S + I_E)$$

式中，I_S 为单位能量所含的结构信息量；I_E 为单位能量所含的效用信息量；k 为常量。

中稻密植生态系统模型

吴绍文、陈宇良：中稻密植生态系统数学模型的初步研究 生态学报，1986，6(2)

（1）系统的总传递函数模型：

$$T(s) = \frac{x(s)}{f(s)} = \frac{G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)}{[1 + D_1(s)G_1(s)][1 + D_2(s)G_2(s)G_3(s)]}$$

（2）总传递函数的灵敏度模型：

$$S_{G_1}^T = \frac{1}{1 + D_1G_1} \qquad S_{G_2}^T = \frac{1}{1 + D_2G_2G_3}$$

$$S_{G_3}^T = \frac{1}{1 + D_2G_2G_3} \qquad S_{G_4}^T = 1$$

$$S_{D_1}^T = -\frac{1}{1 - D_1G_1} \qquad S_{D_2}^T = -\frac{D_2G_2G_3}{1 + D_2G_2G_3}$$

门司公式与卜松分布模型

张厚：论门司公式与卜松分布的关系 生态学杂志，1986，5(3)

（1）门司公式：

$$\tau = e^{-KL}$$

式中，τ 为群体内观测高度上的直射光穿透率(透光率)；K 为消光系数；L 为相应的累计叶面积指数。

（2）卜松分布模型：

$$P_k(L) = \frac{(KL)^k}{k!}e^{-KL}$$

式中，$P_k(L)$为在(O, L)层内出现 k 层有效叶的概率。

森林生态系统的灰色预测模型

文剑平：灰色系统理论及其方法在森林生态系统研究中的应用 生态学杂志，1986，5(5)

$$\hat{X}^{(1)}(t_{k+1}) = \left[X^{(0)}(t_1) - \frac{u}{a}\right]e^{ak} + \frac{u}{a} + \delta_{(k-j)}\hat{q}^{(1)}(t_{k+1})$$

$$\delta_{(k-j)} = \begin{cases} 1 & (k \geq j) \\ 0 & (k < j) \end{cases}$$

式中，t 为某一生态系统的某个状态时间，而 k 与 j 均为系统的不同状态；a 为模型参数向量；$x^{(0)}(t_1)$为系统初始状态的累加序列；$x^{(1)}(t_{k+1})$为系统在 k+1 状态的一次累加序列的拟分值。

群落结构的空间生态位模型

高玮，钱国桢：天童常绿阔叶林中鸟类群落结构的空间生态位分析 生态学报，1987，7(1)

（1）生态位重叠程度模型：

$$a_{xy}(D) = 1 - 1\Bigg/\left(2\sum_{i=1}^{n}\left|P_{xi} - P_{yi}\right|\right)$$

式中，P_{xi} 和 P_{yi} 分别为种 x 和种 y 在第"i"项资源中出现的数目占各自个体总数的比例；$a_{xy}(D)$的值域从0(没有重叠)到1(完全重叠)。

（2）种的生态位宽度模型：

$$H = -\sum_i P_i \ln P_i / H^*$$

$$H^* = -\ln N$$

式中，P_i 为某种鸟类在第"i"项资源中出现的数目占个体总数的比例；N 为每个资源序列的总单位数。

（3）物种多样性指数模型：

$$H' = -\sum_i P_i \ln P_i$$

式中，P_i为群落中第 i 种的个体总数占总个体数的比例。

（4）均匀性指数模型：

$$J = H'/H'_{max}$$

式中，H'_{max} 和 H' 得最大理论值。

亚热带森林群落的生态优势度模型

彭少麟：广东亚热带森林群落的生态优势度 生态学报，1987，7(1)

（1）生态优势度模型：

$$C' = \sum_{i=1}^{s}(n_i / N)$$

式中，s 为样地种数；n_i 为第 i 个种的个体数；N 为样地总个体数。

（2）物种多样性指数模型：

$$D=3.3219(\lg N-\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{S}n_i\lg n_i)$$

(3) 均匀度模型：

$$J=\frac{\lg N-\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{S}n_i\lg n_i}{\lg N-\frac{1}{N}\left[a(S-\beta)\lg a+\beta(a+1)\lg(a+1)\right]}$$

式中，$a=(N-\beta)/S$，β 为 N 被 S 整除以外的余数。

系统灵敏度系数

李典谟、R. L. Tummala：榕叉负泥虫种群系统的灵敏度分析．生态学报，1987，7(2)

$$S(P_0,t)=\frac{\partial x(t,P_0)}{\partial P_0}$$

式中，$S(P_0,t)$ 为系统灵敏度系数，P_0 为系统参数初始扰动。

逻辑斯谛方程

香开宏：鲁北滨海盐生草甸獐茅群落生长季动态．植物生态学与地植物学学报，1987，11(3)

$$y=\frac{K}{1+e^{a-rt}}$$

式中，y 为生物量；k 为经验系数；a 为半月平均气温；t 为时间(单位为半月)。

不同放牧强度下高寒草甸植被演替规律的数量分析模型

周兴民、王启基：不同放牧强度下高寒草甸植被演替规律的数量分析．植物生态学与地植物学学报，1987，11(4)

(1) 不同放牧强度下植物群落沿 x 轴对群落 a 的距离 $x_{(i)}$ 模型：

$$x_{(i)}=\frac{(L)^2+(D_{ai})^2-(D_{bi})^2}{2L}$$

式中，L 为群落 a 和 b 间的相异系数；D_{ai} 和 D_{bi} 分别为群落 a，b 与所求群落间的相异系数；$i=1,2,\cdots,n$ 为不同放牧强度下的植物群落。

(2) 不同放牧强度下的植物群落的不吻合性差度值 $e_{(i)}$ 模型：

$$e_{(i)}=\sqrt{D_{ai}^2-x_{(i)}^2}$$

(3) 不同放牧强度下植物群落沿 y 轴对群落 a' 的距离 $y_{(i)}$ 模型：

$$y_{(i)}=\frac{(L')^2+(D_{a'i})^2-(D_{b'i})^2}{2L'}$$

式中，a' 为具有最高 e 值的群落；其他与 1 中对应相同。

(4) 不同放牧强度下成对群落的排序间距模型：

$$\text{排序间距}=\sqrt{dx^2+dy^2}$$

式中，dx，dy 分别为 x 轴和 y 轴上群落间距。

群体光合、暗呼吸和蒸腾作用的测定模型

祖元刚，常杰：野外条件下测定群体光合、暗呼吸和蒸腾作用的装置和方法．植物生态学与地植物学学报，1987，11(4)

(1) 净光合速率模型：

$$P_n=\frac{(C_1-C_2)\cdot 10^{-6}\cdot F\cdot K\cdot P}{A}+S_r$$

式中，P_n 为植物群体的净光合速率；C_1、C_2 分别为送气管和出气管中空气的 CO_2 浓度；F 为进入人工气候箱内的气体流量；K 为温度校正后的 CO_2 每升体积的重量；P 为气压订正值；A 为人工气候箱内植物群体的叶面积或箱内所占的地面积；S_r 为当时的土壤呼吸速率。

(2) 暗呼吸速率模型：

$$R_d=\frac{(C_2-C_1)\cdot 10^{-6}\cdot F\cdot K\cdot P}{A}-S_r$$

式中，R_d 为植物群体的暗呼吸速率。

(3) 土壤呼吸速率 S_r 模型：

$$S_r=\frac{(C_2-C_1)\cdot 10^{-6}\cdot F\cdot K\cdot P}{A}$$

式中，A 为人工气候箱内所占地面积。

(4) 蒸腾速率模型：

$$T_r=\frac{(W_2-W_1)\cdot F}{A}-S_v$$

式中，T_r 为植物群体的蒸腾速率；W_1 和 W_2 分别为送气管和出气管中空气的绝对湿度；S_v 为当时的土壤蒸发速率。

(5) 土壤蒸发速率 S_v 模型：

$$S_v=\frac{(W_2-W_1)\cdot F}{A}$$

Whittaker 相似性指数

刘焕金，卢欣，苏化龙等：太原市南郊区雀科鸟类冬季群落生态的初步研究　生态学杂志，1987，6(6)

$$I = 1 - 0.5\left(\sum_{i}^{s} |a_i - b_i|\right)$$

式中，s 为 a、b 群落中相对应的种数；a_i 和 b_i 为物种 i 的个体数在 a，b 群落中的比例。

群落-生境相关性指数

Zhang D：衡量群落和生境相关性强弱的指数　Ecological Modelling. 1988, 40

假设我们有 N 个群从样本，用矩阵表示为：

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_{m1} & S_{m2} & \cdots & S_{mN} \end{pmatrix}$$

式中，S_{ij} 表示群从 j 中物种 i $(i = 1,2,\cdots,m)$ 的丰富度，且 $V = \begin{pmatrix} V_{11} & V_{12} & \cdots & V_{1N} \\ V_{21} & V_{22} & \cdots & V_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ V_{k1} & V_{k2} & \cdots & V_{kN} \end{pmatrix}$，$V_{ij}$ 表示群从 j 中环境变量 i $(i = 1,2,\cdots,k)$ 的值。

首先，基于矩阵 S，N 个群从聚集成 r 组，分别用 $S^{(1)}, S^{(2)},\cdots, S^{(r)}$ 标识；其次，基于矩阵 V，N 个群从也可以聚集成 r 组，分别用 $V^{(1)}, V^{(2)},\cdots, V^{(r)}$ 标识。$N(\varphi)$ 表示集合 φ 中元素的数量。对于每一个 $S^{(i)}$ $(i=1,2,\cdots,r)$ 存在一个集合 $V^{(bi)}$，满足：

$$N(S^{(i)} \cap V^{(bi)}) = \max_{1 \le f \le r} N(S^{(i)} \cap V^{(f)})$$

因此，C_{SRI_i} 被定义为：

$$C_{SRI_i} = N(S^{(i)} \cap V^{(bi)}) / \max\{N(S^{(i)}), N(V^{(bi)})\}$$

森林生态系统过程模型

Running S W, Coughlan J C：森林生态系统过程区域应用的一般模型Ⅰ．水分平衡，树冠气体交换和初级生产过程　Ecological Modelling. 1988, 42

(1) 气象相关变量：

$$S_{vp} = 6.1078 \exp \frac{17.269 T_{air}}{237.3 + T_{air}}$$

式中，S_{vp} 是一定大气温度下的饱和水汽压；T_{air} 是大气温度

(2) 白昼子模型：

$$L_{wp} = 0.2/(S_{H_2O}/S_{cap})$$

式中，L_{wp} 是白昼最大叶片水势；S_{H_2O} 是时间 t 的土壤含水量；S_{cap} 是土壤持水量

(3) 树冠 H_2O 阻力模型．

$$CC_w = CC_{max} - D_{CC_w}(L_{wp} - L_{wp_{min}})$$

式中，CC_w 是树冠 H_2O 阻力；CC_{max} 是最大树冠阻力；D_{CC_w} 是 i_{CC}:L_{wp} 的斜率；$L_{wp_{min}}$ 是包括气孔关闭时的最小叶片水势

(4) 湿度降低时的树冠阻力：

$$CC_h = CC_w - (CC_w \cdot D_{CC_h} \cdot AB_{shd})$$

式中，CC_h 是湿度降低时的树冠阻力；DCC_w 是 CC:AB_{shd} 的斜率；AB_{shd} 是绝对湿度亏缺

(5) 树冠蒸腾作用模型：

$$T_{rans} = \{[(S \cdot R_{ad} + (C_p \cdot A_p) V_{pd} / R_a) / (S + GAMMA(1 + R_c / R_a))] / (L_e \cdot 1000)\} I_{la} \cdot L_{day}$$

式中，T_{rans} 是树冠蒸腾作用；S 是饱和水汽压曲线的斜率；R_{ad} 是平均树冠净辐射；C_p 是大气比热；A_p 是大气密度；V_{pd} 是从树冠到大气的水汽压亏缺；R_a 是树冠空气动力学阻力；R_c 是树冠对水蒸气的阻力；GAMMA 是心理测量学常数；L_e 是水蒸气的潜热；I_{la} 是叶面积指数；L_{day} 是白昼长度

(6) 树冠光合作用模型：

$$PSN = [(ACO_2 \cdot C_c \cdot CM)/(CC + CM)] I_{la} \cdot L_{day}$$

式中，PSN 是树冠光合作用；ACO_2 是 CO_2 从树叶到大气的扩散梯度；CC 是树冠阻力；CM 是 CO_2 的树冠叶肉阻力．

(7) 每年子模型：

每年枯枝落叶的腐烂：

$$R_{decomp} = (-3.44 + 0.100 T_{ae}) - [(0.0134 + 0.00147 T_{ae}) G_{li}]$$

式中，R_{decomp} 是每年新鲜的枯枝落叶的百分比重量损失；T_{ae} 是实际的每年土壤水分蒸发蒸腾损失总量；G_{li} 是初始枯枝落叶木质素浓度

环境梯度与植物群落指数模型

潘家华：京西百花山地区环境梯度与植物群落. 植物生态学与地植物学学报，1988，12(1)

(1) 环境梯度的确定——集合环境梯度 G_C 模型：

$$G_C = \frac{1}{3}(G_T + G_M + G_S)$$

式中，G_T、G_M 和 G_S 分别为热量、水湿和土壤肥力梯度

(2) 植物种群环境梯度指数的确定——各个梯度级的重要值指数模型：

$$I_{VI_j} = \sum^{n_j}(C_{ji} + D_{ji})P_j \quad (j = 1,2,\cdots,10)$$

$$P_j = \frac{第i种植物在第j梯度中出现的样地数}{第j梯度的样地总数}$$

式中，I_{VIj} 为某种植物在第 j 梯度的重要值指数；C_{ji} 和 D_{ji} 分别为某种植物 i 在第 j 梯度各样地中的盖度值和密度值即株数；P_j 为某种植物在第 j 梯度各样地中的存在度。

相似矩阵模型

王金福、李典谟：杭州市郊区主要蔬菜害虫群落结构的研究. 生态学报，1988，8(1)

$$R = (r_{ij}) = 1 - \frac{d_{ij}}{M}$$

式中，M 为适当选定的一个常数；$d_{ij} = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2}$，

$x = \frac{L^2 + D_a^2 - D_b^2}{2L}$，$y = \frac{(L')^2 + (D_a')^2 - (D')^2}{2L'}$，

$e = \sqrt{D_a^2 - x^2}$，L 为最不相似的两个群落(a 和 b 群落)间的不相似值，D_a、D_b 分别为 a 和 b 群落与其他群落之间的不相似值，x 为剩下各群落沿 x 轴对 a 群落的距离，e 为各群落吻合性差度值，L' 为具有最大 e 值的群落和对其最不相似的群落之间的不相似值，并作为 y 轴的长度，D_a'，D_b' 分别为 a'，b' 群落与其他群落之间的不相似值；y 为剩下各群落沿 y 轴对 a' 群落的距离。

生物量的生长率模型

杜自治，孙吉雄，张映生等：天祝高寒珠芽蓼草甸初级生产力的研究 I.生物量动态及光能转化率. 植物生态学与地植物学学报，1988，12(2)

(1) 平均绝对生长率 R_{ag} 模型：

$$R_{ag} = \frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1}$$

式中，W_2，W_1 分别为 t_2 和 t_1 时的生物量。

(2) 平均绝对生长率 R_{gr} 模型：

$$R_{gr} = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1}$$

枯枝落叶的分解、积累与营养物质含量动态模型

郭继勋、祝廷成：羊草草甸枯枝落叶的分解、积累与营养物质含量动态. 植物生态学与地植物学学报，1988，12(3)

(1) 消失率 γ 模型：

$$\gamma = \frac{\ln \frac{W_0}{W_e}}{t}$$

式中，W_0，W_e 分别为初始和时间 t 时的枯枝落叶重量。

(2) 消失量比率 y 模型：

$$y = \frac{K}{1 + ae^{-bt}}$$

式中，K 为消失量比率达到稳定状态值；a、b 为参数；e 为自然对数底；t 为时间(天)。

(3) 枯枝落叶重量 B 模型：

$$B = \frac{P}{R}(1 - e^{-Rt})$$

$$P = RB_{ss}$$

式中，B_{ss} 为枯枝落叶达到稳定状态时的重量；P 为枯枝落叶输入量；R 为年消失率。

生态系统信息量 $I(x_1,\cdots,x_n)$

王信理：信息及其对生态系统的控制. 生态学杂志，1988，7(4)

$$I(x_1,\cdots,x_n) = \sum_{i=1}^{n}\frac{a_i}{n}p(x_i)|S_{IG}(x_i)|$$

式中，$p(x_i) = \int w_i f_i(t)\mathrm{d}t$，$f_i(t)$ 为 x_i 的概率分布密度函数，$p(x_i)$ 为 x_i 的概率分布函数；a_i 为加权因子，且 $\sum_{i=1}^{n} a_i = n$，$0 < a_i < n$，$i = 1,2,\cdots,n$；

$$S_{IG}(x_i) = \begin{cases} 1 & (知x_i且肯定) \\ 0 & (不知x_i) \\ -1 & (知x_i但否定) \end{cases}$$，$i = 1,2,\cdots,n$ 为符号函数。

一维映射与 Monte Carlo 方法

周士琦，张国庆，张士昌：一维映射与 Monte Carlo 方法在生态系统中的应用 生态学杂志，1988，7(6)

(1) Volterra 方程：

$$1/X_i\left[dX_i(t)/dt\right]=r_i+\sum_{j=1}^{n}a_{ij}X_j(t)$$

式中，X_i 为第 i 种群的数量；r_i、a_{ij} 为控制参量。

(2) 一维映射模型：

$$y_{n+1}=G/2\{1-D\cos[\pi(y_n+u_b)]\}\equiv f(y_n)$$

式中、G、D、u_b 为控制参量

物种-面积的平衡方程

Aizen M A：使物种-面积对数回归曲线适合非均衡群岛——种模拟方法 Ecological Modelling，1989，47

假定在一个岛屿上达到动态平衡、物种和面积的关系如下：

$$K=CA^{0.25}$$

式中，K 是物种的数量；A 是岛屿的面积；C 是合适的参数

植物群落的选择模型

Gordon I J：Rhum 岛上有蹄类动物对植物群落的选择性 II. 植物群落的选择 Journal of Applied Ecology，1989，26

(1) Jacobs (1974)的选择指数(E)：

$$E=(U_i-A_i)/\{(U_i+A_i)-[2(U_iA_i)]\}$$

式中，U_i 是在植物群落 i 中喂养观测的动物；A_i 是植物群落 i 占据的研究区域；E 是植物群落的利用和可用性之间的相对差异，表明了在每一个植物群落中动物的相对喂养密度。

(2) 为了测定植物群落的利用是否随食物资源的丰富度和质量而变化，通过计算无量纲的植物群落利用宽度指数，算出了每个季节被利用的植物群落的宽度(B)：

$$B=(1/p_i^2)/n$$

式中，p_i 是在植物群落 i 中利用的部分；n 是研究区中可用的植物种群的数量。

生态系统人口承载力 CP 模型

袁伟：生态系统的人口承载力理论初探 生态学杂志，1989，8(1)

$$P_c=\frac{S_m}{\sum_{i=1}^{I}\frac{X_i}{p_i}+\sum_{j=1}^{J}\left(Y_j\sum_{i=1}^{I}\frac{n_{ji}}{p_i}\right)}$$

$$(i=1,2,\cdots,I;\quad j=1,2,\cdots,J)$$

式中，X_i 为平均每人每年对第 i 种植物性食物需要量；Y_j 为平均每人每年对第 j 种动物性食物需要量；p_i 为第 i 种植物性作物的单产；n_{ji} 为生产单位数量第 j 种动物性食物对第 i 种植物性食物需要量，即饲料转化率；S_m 为生态系统中人类可利用的土地资源面积

鸟类群落组成及其多样性指数

丁平，诸葛阳，姜仕仁：浙江古田山自然保护区鸟类群落生态研究 生态学报，1989，9(2)

(1) 鸟类对生境的分布系数模型：

$$A_{dc}=\left(\frac{n}{N}+\frac{m}{M}\right)\times 100\%$$

式中，n 为鸟类出现的样方数；N 为调查总样方数；m 为鸟类出现的生境数；M 为被调查生境类型数

(2) Shannon-Wiener 指数模型：

$$H=3.3219(\lg N-\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{s}n_i\lg n_i)$$

(3) Simpson 优势度模型：

$$D=\frac{N(N-1)}{\sum_{i=1}^{s}n_i(n_i-1)}$$

(4) P_{IE} 种间相遇机率模型：

$$P_{IE}=\sum_{i=1}^{s}\left(\frac{n_i}{N}\frac{N-n_i}{N-1}\right)$$

Whittaker 相似性指数

张永强：农田蜘蛛群落结构及其多样性研究 生态学报，1989，9(2)

$$I=1-1\bigg/\left(2\sum_{i}^{S}|a_i-b_i|\right)$$

式中，S 为 a、b 群落中相对的种数；a_i、b_i 为物种 i 的个体数分别在 a、b 群落种的比例。

羊草群落水分收支的特征模型

常杰，祝廷成：羊草群落水分状况的初步研究 植物生态学与地植物学学报，1989，13(3)

(1) 群落蒸腾耗水量 T_{rm} 模型：

$$T_{rm} = T_r[D + a(d - r)]/1000$$

式中，T_{rm} 为群落月蒸腾耗水量；T_r 为晴天条降下群落的蒸腾速率；D 为月份内的晴天日数；d 为月份内的阴天日数；r 为月份内的雨天日数；a 为阴天与晴天条件下蒸腾速率的比值。

(2) 群落蒸散耗水量 E_{rm} 模型：

$$E_{rm} = E_T[D + a(d - r)]/1000$$

式中，E_{rm} 为群落月蒸散耗水量；E_T 为晴天条降下群落的蒸散速率；D 为月份内的晴天日数；d 为月份内的阴天日数；r 为月份内的雨天日数；a 为阴天与晴天条件下蒸散速率的比值。

群落生产量的推算

吴增志，丈幡久，须崎民雄等：关于日本扁柏人工林光能利用效率的研究(I) 群落生产结构与现存量、生长量和光能利用效率. 植物生态学与地植物学学报，1989，13(3)

(1) 树干的生长量 ΔW_S 模型：

$$\Delta W_S = h_2 A_2 (D^2 H)^{h_2 - 1} \Delta(D^2 H)$$

(2) 枝的生长量 ΔW_B 模型：

$$\Delta W_B = h_1 A_1 {W_S}^{h_1 - 1} \Delta(D^2 H)$$

式中，D 为树干的胸径，以 cm 为单位；H 为树高，以 m 为单位

杉木林系统氮素动态模型

谌小勇，潘维俦：杉木人工林生态系统中氮素的动态特征. 生态学报，1989，9(3)

(1) 氮素动态的数学描述：

$$\frac{dX_j}{dt} = \text{流入} - \text{流出} = (U_{0,j} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{n} a_{i,j} X_i) - (a_{j,0} X_j + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{n} a_{j,i} X_j)$$

式中，X_j，$j = 1, \cdots, n$ 为系统的各分室；$U_{0,j}$ 为从系统外部的获得；$a_{i,j}$ 为周转率，表示物质从 i 分室流向 j 分室的流通性.

(2) 杉木林生态系统氮素动态数学模型：

$$\begin{cases} \dfrac{dX_1}{dt} = -0.09128X_1 - 0.56843X_4 \\ \dfrac{dX_2}{dt} = 0.08073X_1 - 0.00383X_2 \\ \dfrac{dX_3}{dt} = 0.01055X_1 + 0.00383X_2 - 0.53340X_3 + U_{0,3} \\ \dfrac{dX_4}{dt} = 0.52394X_3 - 0.56843X_4 \end{cases}$$

分类单元之间的相似系数

顾式：用聚类分析划分京郊农业生态系统类型. 生态学报，1989，9(3)

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^{m} (X_{ik} - X_{jk})^2$$

式中，$X_{ij} = \dfrac{Y_{ij} - \bar{Y}_j}{S_j}$，$i$ 为分类单元数，j 为综合指标数；Y_{ij} 为原始数据矩阵中第 i 个分类单元第 j 个属性(及指标)的数值；$\bar{Y}_j$，S_j 分别为第 j 个属性的平均值和离差。

养分循环模型

谭云峰，黄建祺，陈新棱等：油茶林生态系统中营养元素循环的研究. 生态学报，1989，9(3)

(1) 系统状态模型：

$$\frac{dX_j(t)}{dt} = U_{1j}(t) + U_{2j}(t) + \cdots + U_{nj}(t) + U_{mj}(t) - V_j(t)$$

式中，U_{ij} $(i = 1,2,3,\cdots,n,m)$ 为营养元素从分室 $1,2,\cdots,n$ 及环境 m 流入分室 X_j 的流通率；V_j 为从该部分流出的流通率。

(2) 油茶林生态系统氮、磷、钾循环的局部动态模型：

1) 氮循环模型：

$$\frac{dx_1^N}{dt} = -0.217x_1^N + 0.098x_3^N + u_{01}^N$$

$$\frac{dx_2^N}{dt} = 0.043x_1^N - 0.2x_2^N + u_{02}^N$$

$$\frac{dx_3^N}{dt} - 0.05x_1^N + 0.2x_2^N - 1.01x_3^N + u_{03}^N$$

2) 磷循环模型：

$$\frac{dx_1^P}{dt} = -0.182x_1^P + 3.09x_3^P + u_{01}^P$$

$$\frac{dx_2^P}{dt} = 0.025x_1^P - 0.5x_2^P + u_{02}^P$$

$$\frac{dx_3^P}{dt} = 0.05x_1^P + 0.5x_2^P - 3.09x_3^P + u_{03}^P$$

3) 钾循环模型：

$$\frac{dx_1^K}{dt} = -0.298x_1^K + 0.864x_3^K + u_{01}^K$$

$$\frac{dx_2^K}{dt} = 0.028x_1^K - 0.5x_2^K + u_{02}^K$$

$$\frac{dx_3^K}{dt} = 0.068x_1^K + 0.5x_2^K - 1.032x_3^K + u_{03}^K$$

式中，x_1^N, x_1^P, x_1^K 为油茶林木和林冠下灌丛中氮、磷、钾养分含量；x_2^N, x_2^P, x_2^K 为枯枝落叶层中氮、磷、钾养分含量；x_3^N, x_3^P, x_3^K 为土壤中氮、磷、钾养分含量；$u_{01}^N, u_{01}^P, u_{01}^K$ 为氮、磷、钾施肥量；$u_{02}^N, u_{02}^P, u_{02}^K$ 为油茶林淋溶水和穿透水中氮、磷、钾含量；$u_{03}^N, u_{03}^P, u_{03}^K$ 为土壤渗下水中氮、磷、钾含量。

植物生物量的动态模型

V. V. Galitsky：植物群落的动态二维模型. Ecological Modelling, 1990, 50

$$\dot{B} = \chi(T)[B/\tau(B) + f_1(B/B_f)\dot{B}_f] - B/\tau(B)$$

式中，$\chi(T) = \min[1, A(T)/A_f(T)]$，并且 $A(T)$ 和 $A_f(T)$ 是群落中植物占据的资源的测量值，它对于 T 年龄段植物的自由生长是十分必要的；T 是植物的年龄；B 是植物的实际生物量；$B_f(T)$ 是自由生长植物的潜在生物量。平衡 $B/\tau(B)$ 的费用的生物量函数来描述为 $B/\tau(B) = \alpha B^k$，$0<k<1$，并且函数 $f_1(x)$ 有下面的属性：当 $0<x<1$ 时，$f_1(0)=0$，$f_1(1)=1$，$0<f_1(x)<1$。

n 个物种系统的生物量模型

Tuzinkevich A V, Frisman Y Y：植物空间分布的耗散结构和补缀状态. Ecological Modelling, 1990, 52

$$\dot{u}_i(t,x) = \int_M \alpha_i(x,y)u_i(t,y)dy - \theta_{ii}(u_i(t,x))\int_M \beta_{ij}(x,y)u_i(t,y)u_j(t,y)dy$$

$$(i = 1,\cdots,n)$$

式中，M 表示一种植物的生长空间；$u_i(x)$ 是在点 $x \in M$ 处，第 i 物种的生物量密度；α_i 是用来定义生物量增加的系数；β_{ii} 是种内竞争的系数；$\beta_{ij}(i \neq j)$ 是种间竞争的系数；t 是时间。

种的生态位分析模型

王刚，杜国祯：黔鼠土丘植被演替过程中的种的生态位分析. 生态学杂志，1990，9(1)

(1) 生态位重叠 N.O.模型：

$$N.O. = \frac{\sum_i \min[f_k(x), f_h(x)]w_i}{\max\left[\sum_i f_k(x)w_i, \sum_i f_h(x)w_i\right]}$$

式中，$f_k(x)$ 和 $f_h(x)$ 分别为种 k 和种 h 的生态位函数；w_i 为资源位加权因子。

(2) 生态位体积 N.V.模型：

$$N.V. = \sum_i f_k(x)w_i$$

农田生态系统的演变特点与机制

赵士鹏：长白山地区龙井县农田生态系统的演变机制及调控战略研究. 生态学报，1990，10(2)

(1) 平均光能利用率模型：

$$R_t = \sum_{i=1}^{4} \frac{Y_{ti}H_iK}{Q_tC_i}E_{ti}$$

式中，R_t 为第 t 年平均光能利用率(%)；Y_{ti} 为第 t 年第 i 种作物平均单产(kg·亩$^{-1}$)；H_i 为燃烧第 i 种作物单位重量所释放的化学潜能(J·kg^{-1})；K 为单位换算系数(K=666.7)；Q_t 为第 t 年生育期内总辐射(J·m^{-2})；C_i 为第 i 中作物经济利用系数；E_{ti} 为第 t 年第 i 种作物种植面积比例(%)。

(2) 动态响应模型：

$$\frac{dY(t)}{dt} + 1.01752Y(t) = 1.061U(t) + 2.6307V(t) + 0.4438$$

式中，$Y(t)$ 为输出的能量密度；$U(t)$ 为输入的无机能量密度；$V(t)$ 为输入的有机能量密度。

(3) 光能利用率的波动指数模型：

$$S_T = \frac{S}{S_0}$$

式中，S 为实际光能利用率；S_0 为光能利用率趋势值。

(4) 农田土壤流失量模型：

$$W = -58.48 - 0.0016P^2$$

式中，W 为年土壤流失量(1×10^4 t)；P 为6~8月降水量(mm)。

欧氏距离模型

建让，张硕新，陈海滨等：秦岭太白山高山灌丛群落研究．植物生态学与地植物学学报，1990，14(2)

$$d_{jk}^2 = \sum_{i=1}^{p}(x_{ij} - x_{ik})^2$$

式中，x_{ij} 和 x_{ik} 分别为第 i 个种在样方 j 和样方 k 中的盖度。

植物群落的生态优势度模型

钱宏：长白山高山冻原植物群落的生态优势度．生态学杂志，1990，9(2)

(1) 重要值 IV_k 模型：

$$IV_k = 33.33\left(\frac{C_k}{\sum_{i=1}^{s}C_i} + \frac{F_k}{\sum_{i=1}^{s}F_i} + \frac{H_k}{\sum_{i=1}^{s}H_i}\right)$$

式中，IV_k 为群落第 k 种群的重要值；C_k, F_k, H_k 分别为第 k 种群在群落中的盖度、频度和平均高度；$\sum_{i=1}^{s}C_i$，$\sum_{i=1}^{s}F_i$ 和 $\sum_{i=1}^{s}H_i$ 分别为该群落中所有 s 个种群盖度和、频度和及平均高度和。

(2) 生态优势度 C 模型：

$$C = \sum_{i=1}^{s}(n_i/N)^2$$

式中，s 为群落中的种群个数；n_i 为第 i 个种群的重要值(IV)；N 为该群落中所有 s 个种群的总重要值。

(3) 种群多样性模型：

$$D = -\sum_{i=1}^{s}\frac{n_i}{N}\log_2\frac{n_i}{N}$$

式中，各项同上。

群落相似系数

李霞雪，蔡立哲，王雄进：厦门潆湖间带蛇尾类动物群落生态的研究．生态学报，1990，10(3)

$$E = \frac{e}{a+b-c}\%$$

式中，a、b 分别为 A、B 底质的种数；e 为 A、B 底质共有种的数量。

任意时刻从土壤中进入植株硒数量模型

李书鼎，曹建华：用 Se 对土壤-小麦系统中硒转移规律研究．生态学报，1990，10(3)

$$Q = 6.5256\times10^{-6}(1 - e^{-0.01429t})$$

一年生植物群体的生长模型

张建新，王天铎：生长期一定时一年生植物群体光合产物的最优分配策略的理论分析．生态学报，1990，10(3)

$$\begin{cases} X_{i+1} = X_i + wr(1-U_i)P_c(1-e^{-KX_i/L}) - K_sX_i \\ R_{i+1} = R_i + U_iP_c(1-e^{-KX_i/L}) \end{cases}$$

式中，X_i 和 R_i 分别为第 i 天植物有活力的叶片重和生殖器官重；P_c 为整个生长期中平均最大群体生长速度；K_s 为比例系数；X_i/L 为单位土地面积上的叶面积；序列 $\{U_i, 0<i\leqslant m\}$ 为植物对营养和生殖器官光合产物分配策略，$U_i=0$ 为全营养生长，$U_i=1$ 为全生殖生长，$0<U_i<1$ 为营养生长和生殖生长同时进行。

综合草害指数及其频率模型

强胜，李扬汉：安徽沿江圩丘农区夏收作物田杂草群落分布规律的研究．植物生态学与地植物学学报，1990，14(3)

(1) 综合草害指数模型：

$$\text{综合草害指数} = \frac{\sum(\text{该级出现的样方数}\times\text{该级代表值})}{\text{调查该类型群落的总样方数}\times\text{最高危害级}}$$

(2) 频率模型：

$$\text{频率} = \frac{\text{该种杂草出现的样方数}}{\text{调查该类型群落的总样方数}}\times100\%$$

不同放牧强度下高寒灌丛群落特征模型

张堪吉：不同放牧强度下高寒灌丛群落特征和演替规律的数量研究
植物生态学与地植物学学报，1990，14(4)

(1) Brilouin 多样性指数和均匀度模型：

$$H' = \frac{1}{N}\lg\frac{N!}{N_1!N_2!\cdots N_i!\cdots N_s!}$$

$$H_{max} = \frac{1}{N}\lg\frac{N!}{\left\{\left[\frac{N}{S}\right]!\right\}^{S-r}\left\{\left[\frac{N}{S}+1\right]\right\}^{r}}$$

$$J = \frac{H'}{H_{max}}$$

式中，H' 和 J 分别为群落的植物多样性指数和均匀度；H_{max} 为植物多样性指数的最大值；N 为群落中植物特征值的总和；N_i 为群落中第 i 种植物的特征值；$\left[\frac{N}{S}\right]$ 为 N/S 的整数部分；r 为 N/S 所得的余项，满足：$N = S\left[\frac{N}{S}\right]+r$，$i=1,2,\cdots,S$。

(2) 重要值模型：

植物重要值=相对盖度+相对频度+相对生物量

几种常见的多样性指数

张明海，蒋前柱，高中信：多样性指数公式在鸟类群落中应用的探讨，生态学杂志，1990，9(5)

(1) Simpson 公式：

$$D_S = 1-\frac{\sum_{j=1}^{S}N_j(N_j-1)}{N(N-1)}$$

式中，D_S 为多样性指数；S 为该集群所包含的物种数；N_j 为多度，即第 j 种的个体数。

(2) Hurlbert 公式：

$$P_{ie} = \sum_{j=1}^{S}\frac{N_j}{N}\frac{N-N_j}{N-1}$$

式中，P_{ie} 为种间相遇几率。

(3) Shannon-Wiener 公式：

$$H' = \left(N\lg N-\sum_{j=1}^{S}N_j\lg N_j\right)\Big/N$$

(4) Pielou 公式(等级多样性公式)：

$$H'_{(F\cdot G\cdot S)} = H'_{(F)}+H'_{(G)}+H'_{(S)}$$

式中，$H'_{(F)}$ 为集群中科的多样性指数；$H'_{(G)}$ 为在科下属分类的多样性指数；$H'_{(S)}$ 为在属下种分类的多样性指数。

气候变化对温带草原生态系统影响的仿真模型

Hunt H W, Trlica M J, Redente E F et al：气候变化对温带草原生态系统影响的仿真模型．Ecological Modelling，1991，53

(1) 水分模型：

$$\frac{dW_1}{dt} = P-L-E-T\times10^{-4}$$

式中，W_1 是最上层中的水分；P 是降水量；L 是排泄到第二层中的部分；E 是蒸发作用；T 是单位土地面积上的蒸腾作用。

1) 蒸发作用：

$$E = P_{e_1}\frac{W_1-P_{e_2}}{P_{e_3}-P_{e_2}}E_{v_1}(V_e)\cdot E_{v_2}(VPD/r_a)$$

式中，P_{E_1} 是最大概率；P_{E_3} 是最高层的持水力；P_{E_2} 是最高层的植物无效水；V_e 是枯枝落叶、活的、死的植物总量；函数 E_{v_1} 是植被和枯枝落叶对蒸发作用的抑制作用；E_{v_2} 通过水汽压差额将温度和相对湿度的影响组合起来；r_a 是树叶边界层阻力。

2) 根部供应水的速率(U_W)：

$$U_w = P_{u_1}R_cE_{t_1}E_{w_1}C_{rw}$$

式中，R_c 是根部生物量；P_{u_1} 是摄取水分的最大速率；函数 E_{t_1} 是土壤温度对水分吸收的影响；函数 E_{w_1} 是植物有效水的影响；C_{rw} 是相对水分含量。

3) 气孔阻力 r_{sw}：

$$r_{sw} = \frac{A(V_1-V_a)T_{p4}T_{p3}E_{12}}{U_w}-r_a$$

式中，A 是枝条面积；V_1 是枝条中的水汽压；V_a 是大气中的水汽压；T_{p4} 是每天蒸腾作用的秒数；T_{p3} 是水蒸气相对于 CO_2 的扩散率；E_{12} 是大气温度对扩散率的影响。

(2) 植被光合作用模型：

$$\frac{dC_1}{dt} = A\frac{C_a - C_1}{r_s + r_a}T_{p4}E_{t2} +$$

$$R_{p1}G_c E_{t4} - \frac{E_1 E_{t3} A P_{p1}}{1 + \frac{P_{p2}}{C_1} + \frac{P_{p8} - P_{p9}}{R_{gn} - P_{p9}}}$$

式中，C_1是枝条空间中CO_2的白昼水平；C_a是大气层中CO_2浓度；R_{p1}是最大呼吸作用率；G_c是枝条的生物量；E_{t4}是大气温度对呼吸作用的影响；E_1是光照强度对碳固定作用的影响；E_{t3}是温度对碳固定作用的影响；P_{p1}是碳固定的最大速率；P_{p2}是二氧化碳固定作用的半饱和常数；R_{gn}是枝条中的N/C比率；参数P_{p9}是枝条N/C比率对于碳固定作用的最小水平；P_{p8}是半饱和常数。

(3) 死亡率：

1) 除了被食草动物吃掉以外，假设冰冻和干旱也会杀死枝条，枝条死亡率D_{g_c}为：

$$D_{g_c} = G_c[D_{p1}E_{t5}(T) + D_{p2}E_{w3}(r_{sw})]$$

式中，D_{p1}是冰冻的最大死亡率；D_{p2}是干旱的最大死亡率；E_{t5}是每周平均最低气温的影响；E_{w3}是水压的影响；T是温度。

2) 根死亡率D_{r_c}：

$$D_{r_c} = D_{p3}R_c E_{w3}$$

式中，D_{p3}是最大速率。

生态系统的优势度

Wood C P：时空模式——一种新的描述方法。Ecological Modelling，1991,58

Ulanowicz (1968)引入了自组织流动网络性能的定量测度，它称之为系统的优势度。

(1) 优势度(A_{sc})在时空均质网络中被定义为：

$$A_{sc} = T \cdot I$$

式中，$T = \sum_{j=0}^{n}\sum_{i=1}^{n+2}T_{ji}$；$I = \sum_{j=0}^{n}\sum_{i=1}^{n+2}\frac{T_{ji}}{T}\lg\frac{T_{ji}T}{T_{j\cdot}T_{\cdot i}}$，是流动网络的平均交互信息，$T_{ji}$是时空上平均的从区室$j$到$i$的流量；·个点代表相应指数的总和。

(2) 时间分割，空间均质网络中的优势度(A_{sc_t})被定义为：

$$A_{sc_t} = TI_t$$

式中，$I_t = \sum_{j=0}^{n}\sum_{i=1}^{n-2}\sum_{k=1}^{r}\frac{T_{jik}}{T}\lg\frac{T_{jik}{}^2T}{T_{ji\cdot}T_{j\cdot k}T_{\cdot ik}}$，观测的时期被分成$r$个相等的时间间隔。

(3) 空间分割，时间均质网络中的优势度，A_{sc_s}，被定义为：

$$A_{sc_s} = TI_s$$

式中，$I_s = \sum_{j=0}^{n}\sum_{i=1}^{n+2}\sum_{l=1}^{s}\frac{T_{jil}}{T}\lg\frac{T_{jil}{}^2T}{T_{ji\cdot}T_{j\cdot l}T_{\cdot il}}$，观测的空间范围被分成$s$个相等的间隔。

(4) 时空分割的网络中的优势度，$A_{sc_{ts}}$，被定义为：

$$A_{sc_{ts}} = TI_{ts}$$

$$I_{ts} = \sum_{j=0}^{n}\sum_{i=1}^{n+2}\sum_{k=1}^{r}\sum_{l=1}^{s}\frac{T_{jikl}}{T}\lg\frac{T_{jikl}{}^2T}{T_{ji\cdot\cdot}T_{j\cdot kl}T_{\cdot ikl}}$$

式中，T_{jik}是在空间上均质的时间间隔k中从j到i的流量；T_{jil}是在时间上均质的空间间隔l中从j到i的流量；T_{jikl}是在时间间隔k和空间间隔l上从j到i的流量。

混农林业生态系统中的光照强度模型

王汉杰：混农林业生态系统内部的光能分布。生态学杂志，1991，10(1)

$$D(\beta', m+1) = T(\beta)D(\beta, m) +$$

$$B_0(\beta)\sum_{\beta=1}^{9}I(\beta)\{D(\beta,m)[r(1-\xi)+t\xi]+$$

$$U(\beta,m+1)[t(1-\xi)+r\xi]\}$$

$$U(\beta,m) = T(\beta)U(\beta,m+1) +$$

$$B_0(\beta)\sum_{\beta=1}^{9}I(\beta)\{D(\beta,m)[t(1-\xi)+r\xi]+$$

$$U(\beta,m+1)[r(1-\xi)+t\xi]\}$$

式中，$D(\beta, m)$和$U(\beta, m)$分别为第m层上因β方向短波辐射引起的向下和向上的辐射通量。

农户生态系统中关键制约因子的定量分析

王天根，王兆骞：农户生态系统定量分析和演替导向的研究。生态学报，1991，11(1)

(1) 制约作用量ΔS_{in}模型：

$$\Delta S_{in} = \int_{B}^{B+n\Delta b_i} SP_i(t)dt$$

式中，$SP_i(t)$，$n\Delta b_i$分别为第i制约因子的制约强度

和制约幅度

(2) 对该制约因子改善的投资效率 Q_i 模型：

$$Q_i = \frac{\int_0^{n\Delta b_i} \left[SP_i(t) - P_i(t) \right] dt}{\int_0^{n\Delta b_i} P_i(t) dt}$$

式中，$P_i(t)$为改善制约因子的费用。

相对光强模型及生物量测定的数学模型

何教煌，林鹏：苏门答腊全合欢群落生物量和凋落物量的研究．植物生态学与地植物学学报，1991，15(1)

(1) 相对光强模型：

$$I/I_0 = e^{-KF}$$

或

$$\ln(I/I_0) = -KF$$

式中，I 为林冠下已知高度的光强；I_0 为林冠上面的光强；K 为各种植物当时的消光系数；F 为群落某一高度到该群落顶部的累计叶面积指数。

(2) 生物量测定的数学模型：

1) 基径曲线式：

$$W = aD^b$$

2) 基径树高式：

$$W = a(D^2 H)^b$$

3) 基径抛物线式：

$$W = a + bD + cD^2$$

式中，W 为林木生物量；H 为株高；D 为基径；a，b，c 分别为常数。

人工林分的生产力模型

周世强，黄金燕：四川红杉人工林分生物量和生产力的研究．植物生态学与地植物学学报，1991，15(1)

$$\Delta P_{\mathrm{N}} = \frac{W}{a}$$

式中，ΔP_{N} 为平均净生产量(表示生产力)；W 为生物量；a 为年龄

自然系统的模拟及灵敏度分析模型

李北忠，赵万源，况荣平：苹果棉蚜与苹果棉蚜日光蜂种间关系的模拟研究　II 自然系统的模拟及灵敏度分析　生态学报，1991，11(2)

(1) 模型的组建：

1) 苹果棉蚜子系统模型：

一龄蚜各发育级的差分式：

$$H_1(t+\Delta t) = \left[H_1(t) - FH_1(t) + FA(t) \right] \left[1 - \Delta t RD_1(t) \right]$$

$$H_i(t+\Delta t) = \left\{ H_i(t) + F\left[H_{i-1}(t) - H_i(t) \right] \right\} \times \left[1 - \Delta t \times RD_1(t) \right] \quad (i = 2,3)$$

二至四龄蚜各发育级的差分式：

$$H_i(t+\Delta t) = \left\{ H_i(t) + F\left[H_{i-1}(t) - H_i(t) \right] \right\} \times \left[1 \quad \Delta t RD_k(t) \right] - \Delta t NA_i(t)$$

$$(i = 4,5,\cdots,10,\ k = 2,3,4)$$

成蚜各发育级的差分式：

$$H_i(t+\Delta t) = H_i(t) + F \times \left[H_{i-1}(t) - H_i(t) \right] - \Delta t \times NA_i(t)$$

$$(i = 11,12,13,14)$$

式中，$H_i(t)$为苹果棉蚜在时刻 t 第 i 发育级中的个体数；$FA(t)$为时刻 t 的成蚜产仔输入；Δt 为模拟步长；$RD_1(t)$ 为在时刻 t 一龄蚜虫的相对自然死亡率；$F = 1 - n\left[\frac{SS(T)}{N(T)} \right]^2$ 为转移比率，n 为发育等级数，$N(T)$ 和 $SS(T)$分别为该龄蚜的发育利奇及其方差，T为温度；$RDk(t)$为在时刻 t 第 k 龄蚜的相对自然死亡率；$NA_i(t)$ 为在时刻 t 第 i 发育级蚜虫的寄生死亡率。

2) 苹果棉蚜日光蜂子系统模型：

EL 阶段各发育级的差分式：

$$P_1(t+\Delta t) = \left[P_1(t) - FP_1(t) + \Delta t NA(t) \right] \times \left[1 \quad \Delta t RD_{EL}(t) \right]$$

$$P_i(t+\Delta t) = \left\{ P_i(t) + F\left[P_{i-1}(t) - P_i(t) \right] \right\} \times \left[1 - \Delta t RD_{EL}(t) \right]$$

$$(i = 2,3,\cdots,6)$$

LP 阶段各发育级的差分式：

$$P_i(t+\Delta t) - \left\{ P_i(t) + F\left[P_{i-1}(t) - P_i(t) \right] \right\} \times \left[1 - \Delta t RD_{LP}(t) \right]$$

$$(i = 7,8,\cdots,12)$$

成虫阶段各发育级的差分式：

$$P_i(t+\Delta t) = P_i(t) + F\left[P_{i-1}(t) - P_i(t) \right]$$

$$(i = 13,14,15)$$

式中，$P_i(t)$为日光蜂在时刻 t 第 i 发育级中的个体数；

$RD_{EL}(t)$ 为在时刻 t 的 EL 阶段相对自然死亡率；$NA(t)=\sum_{i=4}^{14}NA_i(t)$，为寄生产卵输入，相当于苹果棉蚜在时刻 t 二龄至成虫的被寄生之和。

(2) 灵敏度评价指标：

输入日均变化率 R_c 模型：

$$R_c=\frac{O_a-O_b}{O_b}$$

式中，O_a 为改变参数后的平均输出值；O_b 为改变前的平均输出值；R_c 为正时，种群增加，R_c 为负时，种群减少。

群落的多样性、稳定性和优势性模型

王勇，张汉鹄，邹运鼎：茶园蜘蛛、昆虫群落动态的研究。生态学报，1991，11(2)

(1) 多样性指标模型：

$$H=-\sum P_i\log_2 P_i$$

(2) 均匀度模型：

$$E=\frac{H}{H_{max}}=\frac{H}{\log_2 S}$$

(3) 优势度指数模型：

$$d=N_{max}/N$$

式中，P_i 为属于第 i 种的个体总数的概率；H_{max} 为最大多样性指数；S 为总种数；N_{max} 为群落中最多个体种的个体数；N 为所有种的个体总数。

聚集强度模型

宗浩，樊乃昌，于福溪等：高寒草甸生态系统优势鼠种高原鼢鼠和高原鼠兔种群空间格局的研究，生态学报，1991，11(2)

(1) 扩散指标 I 模型：

$$I=\frac{V-M+M^2}{M^2}\cdot\frac{N}{N-1}$$

(2) 平均拥挤 $\overset{*}{M}$ 模型：

$$\overset{*}{M}=\frac{V-M-M^2}{M}$$

(3) Lloyd 聚块性指标 $\overset{*}{M}/M$ 模型：

$$\frac{\overset{*}{M}}{M}=\frac{V-M-M^2}{M^2}$$

(4) 参数 C_a 模型：

$$C_a=\frac{V-M}{M^2}$$

式中，M 为个体平均值；V 为方差；N 为样本总数。

生物系统测度模型

高琼：GM(1,N)模型对生物系统应用的研究 植物生态学与地植物学学报，1991，15(2)

(1) $GM(1,N)$ 模型：

$$\{x\}=[A]\{y\}+\{u\}$$

式中，$\{x\}$ 为系统状态变量向量；$\{y\}$ 为一次累加生成数变量，即 $\{x\}$ 对时间的积分；$[A]$、$\{u\}$ 为待拟合常数矩阵和向量。

(2) 系统线性度 L_i 模型：

$$L_i=\frac{\theta_i}{\theta_c\left[1-\exp\left(-\frac{S_{ri}}{S_{rc}}\right)\right]}$$

式中，θ_i 为相对穿面频数；S_{ri} 为相对标准残差；θ_c，S_{rc} 分别为假定的临界值。

(3) 系统非线性显著度模型——F 检验模型：

$$F_m^n=\frac{SD_N(M-N-n-1)}{SD_E\cdot n}$$

式中，SD_N 为加进非线性项所解释的平方和；n 为包含在回归方程中的二次项数，也是 SD_N 的自由度；SD_E 为残差平方和；$m=M-N-n-1$ 为 SD_E 的自由度。

群落结构分析公式

王宗英，路有成，陈发扬：皖南低丘茶园土壤动物群落结构研究。地理学报 1991，46(2)

(1) Shannon-Wiener 多样性指数公式：

$$\overline{H}=-\Sigma P_i\ln P_i$$

式中，$\overline{H}$ 为物种的多样性指数；$P_i=n_i/N$，n_i 为每一类群的重要值，N 为总的重要值。

(2) Pielou 均匀性指数公式：

$$E=\frac{\overline{H}}{\ln S}$$

式中，S 为群落中的类群数。

(3) Simpson 优势度指数公式：

$$C=\Sigma(n_i/N)^2$$

(4) 密度—类群指数公式：

$$D\cdot G=\Sigma(D_i/D_{i\max})(G/G_T)$$

式中，$D\cdot G$ 为密度—类群指数；D_i 为第 i 类群的密度；$D_{i\max}$ 为各群落中第 i 类群的最大密度；G 为某群落中的类群数；G_T 为各群落所包含的总类群数。

(5) 不同群落间相似性分析扎卡德(Jaccard)系数公式：

$$q=\frac{c}{a+b-c}$$

式中，a 为 A 群落类群数；b 为 B 群落类群数；c 为 AB 两群落共有的类群数。

森林生态系统水循环模型

李飞：南苏格兰森林生态系统水分循环的模拟. 自然资源学报，1991，6(2)

将整个生态系统抽象的看成由五个分室构成即：乔木层、草本层、畦、沟坡和沟底。

(1) 地上部分水分的运动过程：

天然降雨直接进入乔木、草本层以及沟坡和沟底，并且水分以蒸发或蒸腾的形式从这 5 个分室中回归到大气之中。根据这些分室中水分平衡状态可得到如下矩阵方程：

$$\begin{bmatrix}0 & W & Z & Z & Z\\ M & X & 0 & 0 & 0\\ K & Y & F & 0 & 0\\ O & 0 & H & F & 0\\ U & 0 & 0 & F & F\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1-D_C\\ T_A\\ A_{ID}\\ A_{DS}\\ A_{DB}\end{bmatrix}\rightarrow\begin{bmatrix}T_R\\ Q_1\\ Q_2\\ Q_3\\ Q_4\end{bmatrix}$$

式中，$M=\dfrac{R_{DC}T_A}{(1-D_C)}$；$K=R_{AID}$；$O=R_{ADS}$；

$U=R_{ADB}$；$W=R_{DC}$；$X=-(E_{VP}+T_{INC})D_C$；$Y=\dfrac{1}{T_A}Q_1$；

$Z=R(1-D_C)$；$H=\dfrac{1}{A_{ID}}Q_2$；$F=-(E_{VP}-G_{INC})(1-D_C)$；

$F=\dfrac{1}{A_{DS}}Q_3$；R 为天然降雨量；D_C 为乔木的覆盖度；T_A 为实验地的总面积；E_{VP} 为蒸发量；T_{INC} 为降雨被乔木截留部分；G_{INC} 为降雨被草本层截留部分；A_{ID} 为畦的面积；A_{DS} 为沟坡的面积；A_{DB} 为沟底的面积；T_R 为实验地内总的降雨量；Q_1 为降雨被乔木截留后的剩余部分；Q_2 为由畦输入沟坡的水流；Q_3 为由沟坡输入沟底的水流；Q_4 为由沟底输出的水流。

由上式可得：

$$Q_4=[(R-T_{INC}-E_{VP})D_C+(R-G_{INC}-E_{VP})(1-D_C)]T_A$$

令 $R_{EM}=Q_4/T_A$，则在单位面积上雨水被植被(乔木、草本)截留后总的剩余量可用下式来模拟：

$$R_{EM}=(R-T_{INC}-E_{VP})D_C+(R-G_{INC}-E_{VP})(1-D_C)$$

如果再加入变量：以 i 表示日变量，j 表示一天内以 2h 为单位的变量，那么可改写成：

$$R_{EM}(i,j)=[R(i,j)-T_{INC}(i,j)-E_{VP}(i,j)]D_C+[R(i,j)-G_{INC}(i,j)-E_{VP}(i,j)](1-D_C)$$

当暴雨产生时，土壤亚表层水分可能达到极大值(G_{MI})，这是土壤表层水分已经充分饱和就有可能产生地表漫流：

$$O_{VF}(i,j)=e^{-ct}[R_{EM}(i,j)-G_{MI}]$$

式中，c 是常数，它与地形和土壤的性质有关；t 是从开始降雨至产生漫流的时间的延迟。

(2) 地下部分水分运动过程的模拟：

1) 畦：

$$S_G(i,j)=S_G(i,j-1)-Q_G(i,j)+R_{EM}(i,j)+S_I(i,j-1)-E_{VP}(i,j)$$

式中，Q_G 是地下水量；S_I 是亚表层储水量。

地下水量可由下列方程计算：

$$Q_G(i,j)=R_GS_G(i,j-1)$$

式中，R_G 是土壤储水量常数。

以上过程能以下列公式进行模拟：

$$S_I(i,j)=S_G(i,j)-G_{MA}$$

当土壤表面水分完全饱和时，亚表层储水层(S_I)就会达到极大值。如果 S_I 大于 G_{MI}，那么就会在土壤表面产生过剩的水流，即：

$$S_{RI}(i,j)=S_I(i,j)-G_{MI}$$

式中，S_{RI} 是表面流。

亚表层储水量(Q_I)方程式中，间流直线相关，即：

$$Q_I(i,j)-S_I(i,j)R_I$$

2）沟坡过水面积计算公式：

$$P_{ERI} = S_G(i,j)A_{DS}/G_{MA}$$

3）沟底的水文过程：

首先仅考虑进入沟底的地下水：

$$D_{SB}(i,j) = D_{SB}(i,j-1) + E_{VP}(i,j) - Q_G(i,j)A_{ID}/A_{DB}$$

如果由上式计算出的 $D_{SB}(i,j)$为负值，则意味着饱和状态下有剩余水存在。这时就会有地下水产生：

$$Q_G(i,j) = -D_{SB}(i,j)A_{DB}/A_{ID}$$

式中，$D_{SB}(i,j)=0$。

(3) 总净流量的模拟：

1) 降雨被截留后的地表径流的计算：

$$Q_O(i,j) = [O_{VF}(i,j)(A_{DB}+P_{ERI})] + [S_{RI}(i,j)A_{ID}]/(A_{ID}+A_{DS}+A_{DB})$$

2) 以 2h 为单位的总径流量的模拟：

$$Q_T(i,j) = Q_O(i,j) + \frac{[Q_G(i,j)+Q_I(i,j)]A_{ID}}{A_{ID}+A_{DS}+A_{DB}}$$

式中，Q_T 是单位时间内的总径流量，其单位是 $mm \cdot h^{-1}$。

(4) 对模拟的检验：

首先引入下列方程(Doglas，1974)：

$$F = \sum_{i=1}^{n}[Q_T(i,j) - Q_{OB}(i,j)]^2$$

式中，F 值是 n 个时间间隔内的径流量模拟值与观测值差的平方和；Q_T 是模拟的径流量；Q_{OB} 是实际观测的流量。

实际观测径流量的方差能用观测值与其均值差的平方来表示：

$$F_O = \sum_{i=1}^{n}[QOB(i,j) - \text{sum}/n]^2$$

式中，sum 是 n 个观测径流量之和。

模拟误差最后由下式计算：

$$E_{FF} = (F_O - F)/F_O \times 100\%$$

式中，E_{FF} 又叫模拟效率，常用来检验一个系统内水分循环过程的模拟效果。

芒萁群落营养元素动态系统分析模型

陈建，钟章成：芒萁群落中营养元素的循环特点．生态学报，1991，11(4)

系统各分室(x_i，$i=1,2,\cdots,n$)元素状态方程：

$$dx_i/dt = (U_{0,j} + \sum_{\substack{i=1 \\ i\neq j}}^{n} F_{i,j}) - (\sum_{\substack{i=1 \\ i\neq j}}^{n} F_{j,i} + V_{i,0})$$

或：

$$dx_i/dt = (U_{0,j} + \sum_{\substack{i=1 \\ i\neq j}}^{n} a_{i,j}x_i) - (\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} a_{j,i}x_j + V_{i,0})$$

式中，$U_{0,j}$、$V_{i,0}$ 分别为外界进入系统甚系统流出的元素量；$F_{i,j}=a_{i,j}x_i$，$F_{j,i}=a_{j,i}x_j$ 分别为分室 i 流入分室 j 和分室 j 流入分室 i 的流通量；$a_{i,j}$，$a_{j,i}$ 分别为分室 i 流入分室 j 和分室 j 流入分室 i 的流通率。

时空生态位模型

秦玉川，蔡宁华，黄可训：山楂叶螨、苹果全爪螨及其捕食性天敌生态位的研究Ⅰ*——时间与空间生态位．生态学报，1991，11(4)

(1) 生态位宽度模型：

$$B_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^{s} p_i^2 s}$$

式中，p_i 指在一个资源集合中第 i 单位中该物种所占的比例；s 指资源集合中的总单元数；$0<B_i<1$

(2) 生态位重叠模型：

$$C_1^* = \frac{2\sum_{i=1}^{s} p_{1i}p_{2i}}{\sum_{i=1}^{s} p_{1i}\frac{n_{1i}-1}{N_1-1} + \sum_{i=1}^{s} p_{2i}\frac{n_{2i}-1}{N_2-1}}$$

式中，N_1、N_2 分别为第一及第二种群的个体总数；n_{1i}、n_{2i} 分别为在第 i 资源单位中各种群个体数；s 为该资源集合的总单位数；$p_{1i}=n_{1i}/N_1$；$p_{2i}=n_{2i}/N_2$；$0<C_1^*<1$。

(3) 动态空间生态位宽度模糊贴近度模型：

$$\tau(B_i, B_{i+1}) \triangleq \frac{\sum_{j=1}^{n}\min\left[\mu_{B_{ij}}(T_j), \mu_{B_{i+1j}}(T_j)\right]}{\sum_{j=1}^{n}\max\left[\mu_{B_{ij}}(T_j), \mu_{B_{i+1j}}(T_j)\right]}$$

式中，时间 T_j 以周计，分为 n 个；$\mu_{B_{ij}}(T_j)$、$\mu_{B_{i+1j}}(T_j)$ 分别为第 i 种群和第 $i+1$ 种群在 T_j 处的隶属度。

生态系统稳定性分析模型

岳天祥，马世骏：生态系统稳定性研究. 生态学报，1991，11(4)

1) 一个系统的总熵随时间的变化：

$$\frac{dS}{dt}=\frac{d}{dt}\int_v S dv=\int_\Sigma d\Sigma n\cdot J_s+\int_v dv\cdot\sigma$$

式中，J_s为通过单位面积的熵的交换速率，即熵流；σ为单位体积中产生熵的速率，即熵产生。

2) 熵 S 和熵产生 P 的关系：

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{1}{2}(\delta^2 S)\right]=\int dv\cdot\sum_k \delta J_k\cdot\delta X_k=\delta_x P$$

式中，$\frac{1}{2}(\delta^2 S)$的时间导数正好是超熵产生$\delta_x P$。

(2) 种群的稳定区域：

受环境阻力影响的 K 型增长模型：

$$\frac{dN}{dt}=rN\left(1-\frac{N}{K}\right)$$

式中，K 为环境容量；显然，广义流为 $J=N$、广义力为$X=r\left(1-\frac{N}{K}\right)$。

长芒草草原和苜蓿人工草地水分利用模型

李凤民，张振万：宁夏盐池长芒草草原和苜蓿人工草地水分利用研究。植物生态学与地植物学学报，1991，15(4)

(1) 腾耗水量植物种生物量模型：

$$群落阶段蒸腾耗水量W_T(mm)=\sum_{i=1}^{N}(第i日的群落日蒸腾强度\times 第i日的群落绿色生物量/1000)$$

$$群落日蒸腾强度(g\ g^{-1}_{F}\cdot d^{-1})=\sum_{i=1}^{N}(i植物种日蒸腾强度\times 植物种生物量比率)$$

式中，i植物种生物量比率是植物种i的生物量与所测定的N个植物种总生物量的比值。

(2) 水量平衡模型：

对于棵地有：

$$W_T=0$$
$$W_E=W_{ET}$$

对于草地总的水分平衡为：

$$\Delta W=R-W_{ET}$$

在 0~180cm 土壤范围内，水分平衡为：

$$\Delta W_1=W_{S2}-W_{S1}$$

在 180cm 以下土壤中的水分平衡量为：

$$\Delta W_2=(W_{S1}+R)-(W_{ET}+W_{S2})$$

式中，W_{ET}为群落阶段蒸散耗水量；W_{S1}和W_{S2}分别为阶段始末的土壤含水量；R为阶段降雨量；W_E、W_T分别为阶段蒸腾和蒸发耗水量。

(3) 水分利用效率模型：

蒸腾效率(‰)=生物量增长(g·m^{-2})/蒸腾耗水量(mm)/1000

蒸散效率(‰)=生物量增长(g·m^{-2})/蒸散耗水量(mm)/1000

蒸腾系数 W_W(mm)=土壤最大吸湿水(mm)×1.5

水力利用强度(%)=$W_{ET}/[(W_{st}-W_W)+R]$×100%

生态系统组分的放射本能及优势度模型

Salomonsen J：沿着超营养作用梯度考察放射本能、功率和优势度属性. Ecological Modelling, 1992, 61

(1) 生态系统组分的放射本能(E_x)：

$$E_x=RT\sum_{i=1}\left[C_i\ln(C_i/C_{eq,i})-(C_i-C_{eq,i})\right]$$

式中，R是气体常数；T是环境的绝对温度；C_i表示第i个组分；n是组分的数量；$C_{eq,i}$是热力平衡中第i个组分携带的信息。

(2) 生态系统的优势度 (A)：

$$A=T\sum\sum f_{j,i}Q\log_2(f_{j,i}/Q')$$

式中，T是总的生产量；$f_{j,i}$是从区室j输出到区室 i 的部分；Q和Q'分别是所有从区室j输出的总和和所有输入到区室i中的总和，它们都经过T的正规化处理。

稳定态生态系统模型

Christensen V, Pauly D：ECOPATH II——一个用于配平稳定态生态系统模型和计算网络特征的软件. Ecological Modelling, 1992, 61

(1) 优势度：

平均交互信息 I 如下：

$$I=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}f_{ij}Q_i\lg\left(f_{ij}/\sum_{k=1}^{n}f_{kj}Q_k\right)$$

式中，n是系统中的组数；如果T_{ij}是从j到i的能量流的量度，则$f_{ij}=T_{ij}/\sum_{k=1}^{n}T_{kj}$，$f_{ij}$是来自$j$的总能量流；$Q_i=\sum_{k=1}^{n}T_{ki}/\sum_{l=1}^{n}\sum_{m=1}^{n}T_{lm}$，$Q_i$是一个单位的能量流经$i$的概率。

优势度 A：

$$A = TI$$

式中，$T=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}T_{ij}$；优势度的大小有一个上限，这个上限被称为发展能力 C，可表达为 $C = HT$，$H=-\sum_{i=1}^{n}Q_i\lg Q_i$，$H$ 被称为统计熵。

(2) Pauly 等人引入"杂食指数"的概念来部分的描述消费者的进食行为。第 i 组的杂食指数(O_{I})如下：

$$O_{\mathrm{I}_i}=\sum_{j=1}^{n}(T_{\mathrm{L}_j}-T_{\mathrm{L}})^2 D_{\mathrm{C}ij}$$

式中，$T_{\mathrm{L}j}$是被捕食者 j 的向性水平；T_{L}是被捕食者的平均向性水平；$D_{\mathrm{C}ij}$ 是在捕食者 i 的平均食物中被捕食者 j 所占的部分。

(3) 选择指数：

最广泛使用的选择指数之一是 Ivlev 选择指数 E_i，被定义为：

$$E_i=(r_i-P_i)/(r_i+P_i)$$

式中，r_i是在捕食者的食物中被捕食者的相对丰富度；P_i是生态系统中被捕食者的相对丰富度。

一个更好的方法可能是使用标准化的草料比率(S_i)：

$$S_i=(r_i/P_i)\Bigg/\left(\sum_{j=1}^{n}r_j/P_j\right)$$

流动网络中区室 i 对于参数 p_l 变化阻力

Nakajima H：流动网络的灵敏性和稳定性. Ecological Modelling, 1992, 62

$$\frac{1}{S_i}=\frac{1}{\sum_{j=1}^{n}s_{ij}\frac{\partial}{\partial p_l}\left(\sum_{k=1}^{n}f_{jk}-\sum_{k=1}^{n}f_{kj}\right)}$$

式中，$s_{ij}=\lim_{\Delta z_j\to 0}\frac{\Delta x_i}{\Delta z_j}\ (i,j=1,\cdots,n)$，$x_i$ 表示区室 i $(i=1,\cdots,n)$ 的储量，Δz_j 是流入区室 j 的数量 I。我们将比例 $\Delta x_i/\Delta z_j$ 称为 x_i 关于流入量 z_j 变化的流入灵敏性；f_{jk} 是区室 k 和 j 之间的相互流动；$p_l\ (l=1,\cdots,m)$ 是系统的参数

生态位模型

陶正良，罗志义：桔园野生植物层节肢动物群落的研究. 生态学报，1992，12(2)

(1) 生态位宽度指数模型：

$$B=\sum P_i^2/S$$

式中，S 为单位资源的总数；P_i 为第 i 种与资源 j 相关的个体比例。

(2) 生态位重叠模型：

$$O_{ij}=\frac{\sum_{a=1}^{n}P_{ia}P_{ja}}{\sqrt{\sum_{a=1}^{n}P_{ia}^2\sum_{a=1}^{n}P_{ja}^2}}$$

式中，P_{ia} 为第 i 种利用的第 a 种资源的比例。

广义 Logistic 模型

赵景柱，刘宗超，王如松：生态系统优势种演替模型的定量分析. 生态学报，1992，12(2)

$$\dot{x}=Kx(N-x)-dx$$

式中，x 为种群数量的现存值；K 为种群出生率；N 为环境容量；d 为死亡率。

羊草群落优势度模型

殷立娟，张为政，石德成：土壤盐碱化程度及非毛管孔隙度对羊草群落生物量及优势度的影响. 生态学报，1992，12(4)

$$Y=\frac{Y_{\mathrm{m}}}{1+Ae^{a(X_1+dX_2)^2+b(X_1+dX_2)}}+C$$

式中，Y_{m}理论上优势度允许变化的最大值；X_1，X_2分别为盐度和土壤非毛管孔隙度；C 为可生存的最低本底优势度；A，a，b 为参数。

受干扰北方阔叶林生态系统的早期连续过程模拟模型

Mou P, Fahey T J：再生——模拟受干扰的北方阔叶林生态系统的早期连续过程的计算机模型。Journal of Applied Ecology, 1993, 30

(1) 资源有效性计算：

1) 在位置 $\boldsymbol{r}$ 处，植物 i 的根的影响、$P_{\mathrm{R}i}(\boldsymbol{r})$，计算如下：

$$P_{\mathrm{R}i}(\boldsymbol{r})=\frac{b_i+c_i\exp(-\beta_i|\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_i|)}{1+\exp[\mu_i(|\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_i|^2-a_i^{\ 2})]}$$

式中，$\boldsymbol{r}$ 是任何已知点的位置向量；$\boldsymbol{r}_i$ 是植物 i 的位置；a_i，b_i，c_i，β_i 和 μ_i 是物种参数，a_i 是根系的外围半径，b_i 是根在伸展区内的影响，c_i 是根在中心区的额外影响，β_i 是中心区附件根的影响对 $P_{\mathrm{R}i}(\boldsymbol{r})$的修正系数，$\mu_i$ 是在外围附近根影响下的吸收系数。

2) 在位置 $\boldsymbol{r}$ 处、植物 i 的树冠的影响、$P_{Ci}(\boldsymbol{r})$，计算如下：

$$P_{Ci}(\boldsymbol{r}) = P_{C0i}\exp(-\phi_i|\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_i|^2)$$

式中，ϕ_i 和 P_{C0i} 都是物种参数；P_{C0i} 是植物 i 的最大树冠影响；ϕ_i 是树冠影响下的吸收系数。

3) 在位置 $\boldsymbol{r}$ 处，植物 i 的树干的影响，$P_{Si}(\boldsymbol{r})$，计算如下：

$$P_{Si}(\boldsymbol{r}) = \exp(-z_i|\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_i|)$$

式中，z_i 是树干影响下的吸收系数。

(2) 剩余土壤资源有效性方程：

首先，对水分有效性，X：

$$X_k = X_{k-1}(1-h_R P_{Rk})\times (1-h_C P_{Ck})\left(1+\frac{h_S P_{Sk}\pi P_{C0k}}{\phi_k}\right)$$

式中，X_k 是在任何已知点处，容纳了 k 个个体后的水分有效性；h_R 是根对水分有效性的影响；h_C 是树冠的影响；h_S 是树干的影响。

其次，对于有限的有限营养 Z：

$$Z_k = Z_{k-1}(1-n_R P_{Rk})(1+n_C P_{Ck})(1-n_S P_{Sk})$$

式中，Z_k 是在任何已知点处，容纳了 k 个个体后的营养有效性；n_C、n_R 和 n_S 是树冠、树根和树干的权重因子。

(3) 对于植物 i 的水分有效性，H_i：

$$H_i = \frac{\sum_{r=0}^{a_i} P_{Ri}(\boldsymbol{r})X_0(\boldsymbol{r})}{\sum_{r=0}^{a_i}\sum_{i=1}^{n} P_{Ri}(\boldsymbol{r})}$$

$$P'_{Ri} = \frac{P_{Ri}(\boldsymbol{r})}{\sum_{i=1}^{n} P_{Ri}(\boldsymbol{r})}$$

(4) 植物 i 的营养有效性方程，N_i：

$$N_i = \frac{\sum_{r=0}^{a_i} P'_{Ri}(\boldsymbol{r})Z_0(\boldsymbol{r})}{\sum_{r=0}^{a_i}\sum_{i=1}^{n} P_{Ri}(\boldsymbol{r})}$$

(5) 植物生长方程：

$$\frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{W_{Lk}\Omega q(I_i H_i N_i)}{I_i H_i + I_i N_i + N_i H_i} - \frac{W_{Lk}}{1+\exp\left[\frac{\Delta H_L}{g}\left(\frac{1}{T_{\frac{1}{2}L}}-\frac{1}{T}\right)\right]+\exp\left[\frac{\Delta H_H}{g}\left(\frac{1}{T_{\frac{1}{2}H}}-\frac{1}{T}\right)\right]}$$

式中，$\Delta W/\Delta t$ 是在每个时间阶段 Δt 的干物质的增加量；W_{Lk} 是树叶的干物质；Ω 是随物种不同而变化的固有生长率；I_i、H_i 和 N_i 是刚才描述的资源有效性。参数 q 是物种依赖性；g 是气体常数；$T_{\frac{1}{2}L}$ 和 $T_{\frac{1}{2}H}$ 是当生物化学过程达到最大值的一半时的低温和高温；ΔT_L 和 ΔT_H 是在低温和高温时活化作用的热函；T 是周围环境的温度。

在竞争下的群落动力学模型

Han B, Lin P：种间和种内资源竞争的机制和群落动力学模型. Ecological Modelling, 1993, 69

(1) 一个新的单一物种种群在竞争下的动力学模型：

先进的 Verhulst-Pearl logistic 模型：

$$dN/dt = r_m(R-R_{min})/(R_{opt}-R_{min})N$$

$$R = R_0 - \alpha(NA-E)t$$

式中，N 是个体数量；R 是有效资源的浓度；R_{opt} 是物种的最佳资源浓度的集合；R_{min} 是资源的最小剩余浓度；r_m 是固有生长率；A 是物种对某一资源的吸收率；E 是环境中某一资源的供应率。

(2) 对多种资源竞争下的群落动力学模型：

$$dN_1/dt = r_{m1}(R_1 - R^1_{min1})(R_2 - R^1_{min2})/(R^1_{opt1} - R^1_{min1})/(R^1_{opt2} - R^1_{min2})N_1$$

$$dN_2/dt = r_{m2}(R_1 - R^2_{min1})(R_2 - R^2_{min2})/(R^2_{opt1} - R^2_{min1})/(R^2_{opt2} - R^2_{min2})N_2$$

$$R_1 = R_{10} - \left[\sum_{i=1}^{2} N_i(t)(A_{i1}-E_1)\right]t$$

$$R_2 = R_{20} - \left[\sum_{i=1}^{2} N_i(t)(A_{i2}-E_2)\right]t$$

式中，下标 1 和 2 表示物种 1 和 2

样本平均值的精度模型

Dixon P M, Garrett K A：样本的生态信息——样本大小选择的重新考虑. Ecological Modelling, 1993, 68

对于有限种群，Scheaffer 等人(1986)给出的简单随机样本平均值的变化：

$$\mathrm{Var}\ \overline{X} = \frac{\sigma^2}{n}\frac{N-n}{N-1}$$

式中，n 是样本大小；N 是种群规模；σ^2 是种群的变化.

森林凋落物动态模型

马志贵，王金锡：大熊猫栖息环境的森林凋落物动态研究. 植物生态学与地植物学学报，1993，17(2)

(1) 森林凋落物干重失重率模型：

$$失重率 = \frac{X_0 - X_t}{X_0}\times 100\%$$

式中，X_0 为分解袋内样品的初始干重；X_t 为样品分解 t 时间后的干重。

(2) 森林凋落物的腐解速率模型：

$$\frac{X}{X_0} = e^{-kt}$$

式中，X_0 为森林凋落物的初始重量；X 为放置 t 时间的凋落物残留量；k 为凋落物年腐解率。

垄埂接收的太阳辐射模型

魏朝富，高明，车福才等：浸润垄作稻田土壤生态系统的研究. 生态学杂志，1993，12(3)

$$q = \int_{b_1}^{b_2}\int_{t_1}^{t_2}\left[\cos\alpha + \cot h_0 \cos(A-B)\sin\alpha\right]\mathrm{d}x\mathrm{d}t$$

式中，α 为曲面切角；A 为太阳方位；B 为坡向；h_0 为太阳高度.

样本间相似系数及群落特征模型

钱德举，胡菊香：水域增温对轮虫影响初探. 生态学报，1993，13(3)

(1) 种类组成及样本间相似系数 I_s 模型：

$$I_s = \frac{2c}{2ab-(a-b)c}$$

式中，a, b 为两种样本中所出现的浮游动物种类数；c 为这两种样本中相同的浮游动物种类数。

(2) 群落特征：

1) 多样性指数(H)模型：

$$H = -\sum P_i \log_2 P_i$$

2) 均匀度指数(E)模型：

$$E = \frac{H}{H_{\max}} = \frac{H}{\log_2 S}$$

3) 优势度指数(d)模型：

$$d = \frac{N_{\max}}{N}$$

式中，P_i 为属于第 i 种的个体指数的概率；$H_{\max}$ 为最大多样性指数；S 为总种数；$N_{\max}$ 为优势种的个体数；N 为所有种的个体总数。

林窗的边缘效应强度 E

吴为民，钟章成，毕润成：四川缙云山森林群落林窗边缘效应的研究. 植物生态学与地植物学学报，1993，17(3)

$$E = \frac{mY}{\sum_{i=1}^{m} y_i}$$

式中，Y 为 m 个群落形成的交错区里度量群落内种群数量和结构的定量指标。

农田生态系统中的最优配置模型

姚建民，马素丽：最大概率原理在农田生态系统中的应用. 生态学杂志，1993，12(4)

(1) 各因子追加投入额的最优配置模型：

$$\begin{cases} \Delta P_1 = \dfrac{P\cdot \hat{P}_1}{P} - K_1 \\ \Delta P_i = (K_1 + \Delta P_1)\dfrac{\hat{P}_i}{P_1} - K_i \end{cases}$$

(2) 最优配置所对应的系统主功能 Y 模型：

$$Y = a\left(\frac{\Delta P_1 + K_1}{P_1}\right)^{b_1}\left(\frac{\Delta P_2 + K_2}{P_2}\right)^{b_2}\cdots\left(\frac{\Delta P_i + K_i}{P_i}\right)^{b_i}\cdots\left(\frac{\Delta P_n + K_n}{P_n}\right)^{b_n}$$

式中，ΔP 为系统追加投入额；P 为系统投入总额；ΔP_i 为因子追加投入额；P_i 为因子投入总额；$\hat{P}_i$ 为因子理想投入总额；a 表示各因子投入满足度均为 1 时主功能可达到的最大值；b_i 为第 i 因子投入满足度的弹性系数，$0 \leqslant b_i \leqslant 1$。

改进的邻体干扰 *I* 模型

张跃西：邻体干扰模型的改进及其在营林中的应用。植物生态学与地植物学学报，1993，17(4)

$$I=\sum_{i=1}^{N} l_i^{2} l^{-1} d_i^{-1}$$

式中，l_i 为第 i 邻体的胸围；l 为基株的胸围；d_i 为第 i 邻体到基株的距离；N 为邻体数目。

南部山区冬季鸟类群落生态模型

丛建国：青州南部山区冬季鸟类群落生态的初步研究。生态学杂志，1993，12(5)

（1）群落间的相似性指数 I 模型：

$$I=1-0.5\sum_{i}^{S}|a_i-b_i|$$

式中，S 为 a、b 群落中的相对种数；a_i 和 b_i 为物种 i 的个体数分别在 a、b 群落中的比例。

（2）群落的多样性指数 H' 模型：

$$H'=-\sum_{i=1}^{S} p_i \ln p_i$$

式中，p_i 为物种 i 的个体数占群落种物种总个体数的比例；S 为种类数。

（3）均匀度 e 模型：

$$e=\frac{H'}{\ln S}$$

胶带内辐射平衡和热量平衡模型

冯友鑫：胶茶人工群落胶带内增热效应的研究。生态学报，1994，14(1)

$$R_n=(1-A)Q-F$$
$$R_n=P+LE+Q_s$$

式中，A 为胶带地表反射率；Q，F，P、LE 和 Q_s 分别为胶带内太阳总辐射、地面有效辐射、感热、潜热和土壤热通量。

油蒿的蒸腾作用及群落水分扩散模型

杨宝珍，董学军：油蒿的蒸腾作用及其群落的水分状况。植物生态学与地植物学学报，1994，18(2)

（1）蒸腾速率 E 模型：

$$E=(\rho_c-\rho_a)\frac{F}{A}$$

（2）扩散阻力 r_s 模型：

$$r_s=\frac{A}{F}\left(\frac{\rho_1-\rho_c}{\rho_c-\rho_a}\right)$$

式中，F 为体系干空气流量；A 为被测叶面积；ρ_1 为叶子的水汽密度；ρ_c 为叶室中水汽密度；ρ_a 为干空气流的水汽密度。

群落结构模型

杨一川，庄平，黎系荣：峨眉山峨嵋栲、华木荷群落研究。植物生态学与地植物学学报，1994，18(2)

（1）群落物种多样性指数测度：

1) Simpson 指数 D 模型：

$$D=\frac{N(N-1)}{\sum N_i(N_i-1)}$$

式中，N 为所有物种的个体数，N_i 为第 i 个物种的个体数。

2) Shannon-Wiener 指数 H' 模型：

$$H'=3.3219\left(\lg N-\frac{1}{N}\sum N_i \lg N_i\right)$$

式中，N 为所有物种的个体数；N_i 为第 i 个物种的个体数。

3) 群落均匀度 R 模型：

$$R=\frac{-\sum P_i \lg P_i}{\lg S}$$

式中，P_i 为第 i 个物种的比例；S 为第 i 个物种相应的物种总数。

4) 种间相遇几率 P_{IE} 模型：

$$P_{IE}=\sum\frac{N_i}{N}\frac{N-N_i}{N-1}$$

式中，N 为所有物种的个体数；N_i 为第 i 个物种的个体数。

（2）群落格局：

1) 平均拥挤度 $\overset{*}{m}$ 模型：

$$\overset{*}{m}=\frac{1}{N}\sum X_j(X_j-1)$$

式中，N 为物种个体总数，X_j 为 j 种物种的个数。

2) 聚块性指数 P_I 模型：

$$P_I=\frac{\overset{*}{m}}{m}$$

式中，m 为群落格局拥挤度。

3）格局指数 I_δ 模型：

$$I_\delta=\frac{S}{N-1}\frac{\sum X_j(X_j-1)}{N}$$

式中，X_j 为 j 种物种的种数；N 为物种总数；S 为第 j 个物种相应的物种总数。

(3) Jrenson 系数 I_{S_S} 模型：

$$I_{S_S}=\frac{2c}{a+b}\times 100$$

式中，a 为群落样地 A 的物种数；b 为群落样地 B 的物种数；c 为群落样地 A 与 B 之间共有的物种数。

种子散布模型

Ellison A M, Bedford B L：湿地导管植物群落对扰动的反应—模拟研究。Ecological Applications, 1995, 5(1)

$$s=\frac{c_1e^{(\alpha-1)}\ln(r)e^{r/\beta}}{e^{\alpha}\ln(\beta)\alpha!}$$

式中，s 是散布到离亲本植株 r 个单元距离的种子数目；α 和 β 是分布参数；c_1 是种特异比例常数。

植物群落结构的空间模式指数(C)

Steuter A A, Steinauer E M, Hill G L et al：沙丘草原地区野牛和鼹鼠的分布和食性，Ecological Applications, 1995, 5(3)

T-square 方法用来决定地块空间分布。从一个随机点到最近地块的中心点 p 划一条长度为 x 的线(l)，下一步，量算从 p 点到离 p 点最近的地块中心点的距离 y，过点 p 划一条直线，垂直于直线 l，这样测得一系列 N，则 C 的计算可表达为：

$$C=\frac{\sum_{i=1}^{N}\left[x_i^2\Big/\left(x_i^2+\frac{1}{2}y_i^2\right)\right]}{N}$$

式中，接近 1.5 的数值表示随机模式；比 1.5 小得多的数值表示均衡模式；比 1.5 大得多的数值表示聚集模式。

群落结构对表型变化驱动下物种相互作用模拟模型

Dodds W K, Henebry G M：群落结构对表型变化驱动下物种相互作用的反应的模拟　Ecological Modelling, 1995, 79

(1) 模型包含了群落中的 s 个物种，令 $I_{i,j}$ 表示物种 i 和物种 j 之间相互作用的强度，令 N_t 表示在时间 t 时整个群落中的个体数量，s 表示物种总数，则物种 i 在时间 $t+1$ 时的个体数量($N_{i,t+1}$)：

$$N_{i,t+1}=N_{i,t}\left(a-\sum_{j=1}^{s}I_{i,j}N_j/N_t\right)$$

式中，a 是固有的生长率，所有物种都是相同的。

(2) 物种之间的平均表型距离（U_t）可表示为：

$$U_t=\sum_{i=1}^{s_t}\sum_{j=1}^{s_t}u_{i,j}/[s_t(s_t-1)]$$

式中，$u_{i,j}$ 是在时间 t；物种 i 和 j 之间的不同位置的数量；s_t 是现存物种的数量。

系统能流数学模型

徐明，潘向明：浦沫农业生态系统能流的稳定性及其动态．生态学报，1995，15(1)

$$\frac{dx_i}{dt}=U_{0i}-\sum_{j=0}^{4}r_{ij}X_i+\sum_{j=0}^{6}r_{ji}X_j$$

$$(i=1,2,3,4,5,6\ \text{且}\ i\neq j)$$

式中，U_{0i} 为转移向量；r 为各分室间及各分室与环境间的能量转移速率；X 为各分室的状态。

生态场的空间分布动态模型

王根轩，赵松岭：半干旱生态条件下春小麦群体生态场的空间分布．生态学报，1995，15(2)

$$E_n=\sum_{i=1}^{n}\left\{\alpha_{1i}E_{1oi}\left[1+\left(\frac{\sqrt{x_i^2+y_i^2}}{h_{ci}}\right)^2\right]^{-\frac{3}{2}}+(\alpha_{Ni}E_{Noi}+\alpha_{Wi}E_{Woi})\left[1+\left(\frac{\sqrt{x_i^2+y_i^2}}{h_{ri}}\right)^2\right]^{-\frac{3}{2}}+(\alpha_{ci}E_{coi}+\alpha_{hi}E_{hoi})\left[1+\left(\frac{\sqrt{x_i^2+y_i^2}}{h_{ci}}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}}\right\}$$

式中，α 为生态效应系数；E_o 为在场源处生态因子的相对变化值；l,W,N,c,h 分别表示光照、水分、氮素、CO_2 和相对湿度因子；i 指第 i 株植物；h_c,h_r 分别为冠

层和根系分布中心离地面的高(深)度；x、y 分别为 x 轴和 y 轴的平面直角坐标； E_n 为具有 n 株植物的群体的生态场

胁强系数 s

余世孝：非度量多维测度及其在群落分类中的应用 植物生态学与地植物学学报，1995，19(2)

$$s=\sqrt{\frac{\sum_{i<j}(d_{ij}-\hat{d}_{ij})^2}{\sum_{i<j}d_{ij}^2}}$$

式中，d_{ij} 为点间的欧氏距离。

地上、地下生物量季节动态变化的 Logistic 方程

王启基，周兴民，张堰青等：高寒小嵩草草原化草甸植物群落结构特征及其生物量 植物生态学与地植物学学报，1995，19(3)

$$W_i=\frac{K_i}{1+\exp(A_i-B_it)}$$

式中，W_i 各类群地上生物量；t 为自 4 月 21 日起的生长天数($0<t<140$)； K_i 为各类群地上生物量可能最大值；A_i 和 B_i 为常数。

农林复合生态系统综合效益评价函数

张家来，刘立德：江滩农林复合生态系统综合效益的评价，生态学报，1995，15(4)

(1) 升半梯形函数：

$$U(x)=\begin{cases}0 & (x\leqslant\bar{x}-2\sigma)\\ \dfrac{x-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}} & (|x-\bar{x}|<2\sigma)\\ 1 & (x\geqslant\bar{x}+2\sigma)\end{cases}$$

(2) 降半梯形函数：

$$U(x)=\begin{cases}1 & (x\leqslant\bar{x}-2\sigma)\\ \dfrac{x-x_{\max}}{x_{\min}-x_{\max}} & (|x-\bar{x}|<2\sigma)\\ 0 & (x\geqslant\bar{x}+2\sigma)\end{cases}$$

群落蒸发速率 E

宋炳煜：草原区不同植物群落蒸发蒸腾的研究 植物生态学与地植物学学报，1995，19(4)

$$E=ET-T_r$$

$$ET=\frac{\sum_1^n\Delta W_1}{nS}$$

$$Tr=\frac{\sum_1^n\Delta W_2}{nS}$$

式中，ET 为群落蒸散速率；T_r 为群落蒸腾速率；ΔW_1 为未封石蜡土柱重量的日变化；ΔW_2 为封石蜡土柱重量的日变化；S 为土柱地表面积；n 为该期内测定的日数

光合效率模型

Kremer R G, Running S W：模拟在对照的半干旱植被群落中的季节土壤水平衡 Ecological Modelling, 1996, 84

通过增加树冠对水蒸气的最大通导率、但又不按这个比例增加叶肉对 CO_2 的通导率，模型通过下面的方程计算降低的光合效率：

$$N_{ps}=\frac{\Delta CO_2C_c\cdot C_m}{C_c+C_m}I_{la}L_{day}$$

式中，N_{ps} 是树冠光合作用($kg\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$)； ΔCO_2 是树叶向大气扩散 CO_2 的斜率($kg\cdot m^{-3}$)；C_c 是树冠对水的平均气孔通导率 ($m\cdot s^{-1}$)；C_m 是树冠 CO_2 叶肉通导率；I_{la} 是叶面积指数($m^2\cdot m^{-2}$)；L_{day} 是光合作用活动昼长($s\cdot d^{-1}$)。

生态能量效率测算模型

Zhou J, Ma S, Hinman G W：生态系统辐射本能分析——生态能量研究的一种新方法 Ecological Modelling, 1996, 84

(1) 生态过程能量效率：

任何热力学过程的能量效率都能被估算，一个动物系统的生态过程能量效率也能够被获得：

$$\eta_e^1=\frac{E_P+E_R-E_F+E_Q}{E_I}$$

式中，η_e^1 测算生态过程的热力学效率；E_P 是生产能量；E_R 是呼吸能量；E_Q 是热能；E_F 是排泄物能量，E_I 是摄取的能量。

(2) 同化能量的效率：

$$\eta_e^2=\frac{E_P+E_R}{E_I}$$

式中，η_e^2 表示测算有机体同化作用能量的能力

(3) 生产能量的效率：

$$\eta_e^3=\frac{E_P}{E_I-E_F-E_Q}$$

(4) 呼吸能量的效率：

$$\eta_c^4 = \frac{E_R}{E_I - E_F - E_Q}$$

带有可能性和模糊参数的半干旱牧场生态系统仿真模型

Wu H, Li B, Stoker R et al：带有可能性和模糊参数的半干旱牧场生态系统仿真模型．Ecological Modelling, 1996, 90

(1) 主要和次要产品方程：

$V(t)$ 是在 t 时刻、单位面积上的主要产品比率，修正后的 $V(t)$ 方程表示如下：

$$V(t) = V_{max} K(t) R_c(t)$$

式中，V_{max} 是基于地区的最大可能主要产品标准，单位是以干物质计，$kg \cdot a^{-1}$；$K(t)$是依赖于时间的植物生境特征指数，它反映了植物生长的一般陆地环境状况；$R_c(t)$是植被覆盖度相关的土壤湿润指数（这是指一个范围在 0 到 1 之间的模糊测度值），这个为了计算每单位面积 $H(t)$食草动物虫口数而更新的方程与 1976 年 5 月使用的方程关系密切，可表达为 $H(t+1) = H(t) \cdot [1 + hB_v(t) - m(t)]$，$h$ 是内在繁殖速率，$m(t)$在 t 时刻的死亡率，$B_v(t)$ 是植物单位面积出生率调整值。

(2) 有效雨量指数：

有效雨量指数 $R(t)$综合了降水量和降水分布的影响：

$$R(t) = R_p(t) R_d(t)$$

式中，$R_p(t)$和 $R_d(t)$分别是降水量和降水分布指数；$R_p(t)$表示多年中年降水量的分布，或者说多年中年降水量的一致性；$R_d(t)$用来反映更有利的季内湿润度分布的影响。

(3) 干旱牧场压力：

累计的干旱牧场压力测算方法如下：

$$C(t) = \sum_i \frac{c_i}{1 + \exp\{\alpha_i [x(t) - x_{1/2}^i]\}}$$

式中，运转指数 i 指随着 $x(t)$ 的变化，$C(t)$ 的不同阶段；$x(t)$ 是累计的干旱牧场压力(d-GP)；i 阶段中植被覆盖指数部分，优势种的增长是 c_i；参数 $x_{1/2}^i$ 和 α_i 代表 x 位置和在 i 阶段 $C(t)$ 中灾难比率的下降。

(4) 土壤湿润度指数：

指数 R_c 的加权谐波模糊运算可表达为：

$$R_c(t) = \frac{2C(t)R(t)}{1/C(t) + 1/R(t)}$$

式中，$C(t)$和 $R(t)$分别是植被覆盖度和有效雨量指数。

(4) 植物生境特征指数：

植物生境特征指数 $K(t)$类似于一个生态系统的生态状况，它被更新为：

$$K(t+1) = K(t)[1 + \Delta(t)]$$

式中，$\Delta(t) = b \cdot [x_-(t) - x_+(t)]/[1 + x_-(t) + x_+(t)]$；由于 $K(t)$中百分比变化，$x_+(t) = C(t)R(t)$，$x_-(t) = [1 - C(t)] \cdot \{S + g \cdot \max[0, O_G(t)]\}$，$O_G(t) = GP(t)/GP_o - 1$，函数 $O_G(t)$是过度放牧指示器，$GP(t)$和 GP_o 是实际的和区域相关的参照牧场压力，S 是平均地形参数，被定义为相对于基本比例的高度，g 是一个将 $O_G(t)$转换成斜坡等价物的参数，以便斜坡和过度放牧都对于牧草地生态系统具有可比较的影响，系数 b 不是一个标准化因子，而是一个牧草地相关的测度因子。

森林系统模拟模型

Bossel H：TREEDYN3 森林模拟模型．Ecological Modelling, 1996, 90

(1) 林地中树木的数量 Q 只能随时间而减少，没有再生，即：

$$\frac{dQ}{dt} = -q_{dead}$$

(2) 高度(H)和直径(D) 的生长为正值或 0 时，可表达为：

$$\frac{dH}{dt} = h_{grow}$$

$$\frac{dD}{dt} = d_{grow}$$

(3) 树叶数量 L，好根数量 R 和果实数量 F 按它们各自的增长率增加，按枯萎率减少，同时还随树木的死亡而减少，可表达为：

$$\frac{dL}{dt} = l_{grow} - l_{loss} - l_{dead}$$

$$\frac{dR}{dt} = r_{grow} - r_{loss} - r_{dead}$$

$$\frac{dF}{dt} = f_{grow} - f_{loss} - f_{dead}$$

(4) 同化储量 A 增加：

$$\frac{dA}{dt} = a_{\text{prod}} + a_{\text{reloc}} - a_{\text{resp}} - a_{\text{grow}} - a_{\text{dead}}$$

(5) 木材量 W：

$$\frac{dW}{dt} = w_{\text{incr}} - w_{\text{loss}}$$

(6) 木材中转变的氮总量 N_W：

$$\frac{dN_W}{dt} = w_{\text{incr}}[bv_0 + (1-b)v_i] - v_W w_{\text{loss}}$$

式中，q_{dead} 是树的消枯率；h_{grow} 是高度增量；d_{grow} 是直径增量；l_{grow} 是实际叶片更新生长率；l_{loss} 是树叶脱落率；l_{dead} 是死亡树木的树叶数量损失率；r_{grow} 是实际的根更新生长率；r_{loss} 是好根损失率；r_{dead} 是死亡树木的好根数量；f_{grow} 是果实生长率；f_{loss} 是果实损失率；f_{dead} 是死亡树木的果实；a_{prod} 是树冠每天的生产率；a_{reloc} 是吸收重置的谷物；a_{resp} 是总维持的呼吸作用；a_{dead} 是死亡树木中的吸收损失；w_{incr} 是木材数量的增加率；w_{loss} 是总死亡木材的损失率；b 是呼吸消耗与总木材量的比率；v_0 是呼吸树木的氮容量；v_i 是死亡树木的氮容量；v_W 是树木中氮的平均浓度。

生态系统动态信息挖掘模型

Boudjema G, Chau N P：从自然界记录中挖掘信息的生态系统动态信息挖掘．Ecological Modelling, 1996, 91

(1) 加权移动平均数 (MA)：

$$X_i' = \frac{\sum_{j=1}^{j=m} X_{t-(j-(m-1)/2-1)} w_j}{\sum_{j=1}^{j=m} w_j}$$

式中，m=5； X_t 是初始观测值； X_i' 是加权移动平均之后的观测值，加权因子(w_j)=(0.1, 0.3, 1.0, 0.3, 0.1)。

(2) Takens 埋藏植入方法：

$(x_1, x_2, \cdots, x_n)$是一个观察时间序列，代表一维观测值，我们能够重构一个 p-维序列(X_i, i=1,2,$\cdots$,n-(p-1) τ)，令 $X_i=[x_i, x_{i+\tau}, \cdots x_{i+(p-1)\tau}]$，$\tau$ 是一个常数，称为重构延迟。

(3) Echmann-Ruelle 线性方法(ERL)：

此方法通过线性模型预测已知点 X_t 的下一个点 X_{t+1} 的预测方程可表达为：

$$X_{t+1}=AX_t+B+\varepsilon$$

式中，A 是一个常数矩阵；B 是一个 p-维向量；ε 是剩余残差向量

种群动态模型

Dodds W K, Henebry G M：对群落结构的密度依赖性的影响．Ecological Modelling, 1996, 93

$$N_{i,t+1} = N_{i,t} + am\left(\sum_{j=1}^{s} \frac{I_{i,j} N_{j,t}}{N_t}\right)$$

式中，$N_{i,t}$ 是时间 t 时种群 i 的虫口数；N_t 是在时间 t 总群落虫口数； s 是物种总数；m 是相互作用乘数 (m>0)； a 是密度依赖函数之一；I_{ij} 表示物种 i 和 j 的相互作用力度 ($-1 \leqslant I_{ij} \leqslant 1$)。

如果 $N_{i,t} \leqslant H_i$，那么 $a=N_{i,t}$，否则有：

$$a = N_{i,t}\left[1 - \left(B\frac{(N_{i,t} - H_i)^r}{N_{i,t}^r}\right)^q\right]$$

式中，H_i 是物种明确的虫口极限；参数 B, q 和 r 定义了超出虫口极限之后，增长率下降的多快。

Lambert-Beer 消光定律

任海，彭少麟，张祝平等：鼎湖山季风常绿阔叶林林冠结构与冠层辐射研究．生态学报，1996, 16(2)

$$I = I_c e^{-KI_{la}}$$

式中，I 为距离林冠之下各层入射的辐射通量；I_c 为林冠入射的辐射通量；K 为群落或各层植物的消光系数；I_{la} 为叶面积指数。

棉田生态系统能流特征分析模型

戈峰，丁岩钦：棉田生态系统能流特征分析．生态学报，1996, 16(3)

(1) 棉田初级生产者呼吸量 R 模型：

$$R = \alpha[aW + b(\Delta w/\Delta t)]$$

式中，W 为棉株重量；$\Delta w/\Delta t$ 为单位时间内棉株重量的变化；a, b 为棉株的呼吸常数；α 为氧卡系数。

(2) 次级生产者呼吸量 R 模型：

$$R = \sum_{k=1}^{m}\sum_{i=1}^{n} \frac{W_{i,k-1} + W_{i,k}}{2} R_i \alpha \beta f(T_k) D_k$$

式中，n，m 分别为节肢动物的种类数和调查次数；$W_{i,k-1}$，$W_{i,k}$ 分别为第 i 种第 k-1 次和 k 次调查时的生物量；R_i 为第 i 种的呼吸代谢率；α，β 分别为氧卡系数和田间呼吸量修正值；$f(T_k)$为第 k 次调查时温度系数的作用；D_k 为第 k-1 次到第 k 次调查时的时间间隔。

（3）土壤分解者呼吸量 R 模型：

$$R=\sum_{k=1}^{m}\frac{R_{k-1}+R_k}{2}\alpha WD_k$$

式中，W 为 0~10cm 深度的土壤干重；R_{k-1}，R_k 分别为第 k-1 次和第 k 次测定时土壤呼吸强度；其他同上。

防护林生态系统水量平衡方程

余新晓，陈丽华：黄土地区防护林生态系统水量平衡研究．生态学报，1996，16(3)

$$\Delta W_s=P-I_c-E-T-R_s\pm SF$$

或 $$\frac{\partial W_s}{\partial t}=P(t)-Ic(t)-E(t)-T(t)-R(t)_s\pm SF(t)$$

$$\int_{t_1}^{t_2}\int_0^{Z_r}\frac{\partial W_s}{\partial t}\mathrm{d}z\mathrm{d}t=\int_{t_1}^{t_2}\int_0^{Z_r}[P-I_c-E-T-R_s\pm SF]\mathrm{d}z\mathrm{d}t$$

式中，P 为大气垂直降雨量；I_c 为森林植被冠层截留量；E 为森林植被叶片蒸腾量；T 为土壤蒸发量；R_s 为地表径流量；ΔW_s 为根际区土壤储水变化量。

主要树木种群间联结关系模型

李德志，秦艾丽，杨茂林等：天然次生林群落中主要树木种群间联结关系的研究．植物生态学报，1996，20(3)

（1）点相关系数 φ 模型：

$$\varphi=\frac{ad-bc}{\sqrt{(a+b)(a+d)(a+c)(b+d)}}$$

式中，a 为两个种都存在的样方数目；b 为 B 种存在而 A 种不存在的样方数目；c 为 A 种存在而 B 种不存在的样方数目；d 为两个种都不存在的样方数目。

（2）χ^2 检验模型：

$$\chi^2=\frac{n\left(|ad-bc|-\frac{1}{2}n\right)^2}{(a+b)(a+d)(a+c)(b+d)}$$

式中，n 为取样总数；其他同上。

封闭系统中微生物种群生长的动态模型

刘多森，李振高，汪枞生等：关于封闭系统中微生物种群生长的动力学建模．生态学报，1996，16(4)

（1）微生物利用养分的动力学：

限制性养分浓度 x 随时间 t 的变化模型：

$$\ln\frac{x}{x_0}+\frac{g_2}{g_1-g_2}\ln\frac{x-g_1}{x_0-g_1}+\frac{g_1}{g_2-g_1}\ln\frac{g_2-x}{g_2-x_0}=-k_1t$$

$$(g_1<x_0<g_2)$$

式中，g_1，g_2 和 k_1 均为与 m 有关的常量；m 为可降解农药的微生物在时间 t 的数量；x 为农药在时间 t 的浓度；x_0 为农药的初始浓度。

（2）封闭系统中微生物种群生长的建模：

封闭系统中微生物种群生长的动力学模型：

$$\ln\frac{\sqrt{M-\xi_1}\pm\sqrt{M-m}}{\sqrt{M-\xi_1}+\sqrt{M-m_0}}-\frac{\sqrt{M-\xi_1}+\sqrt{M}}{2\sqrt{M}}\ln\frac{\sqrt{M}\pm\sqrt{M-m}}{\sqrt{M}+\sqrt{M-m_0}}+\frac{\sqrt{M-\xi_1}-\sqrt{M}}{2\sqrt{M}}\ln\frac{\sqrt{M}\mp\sqrt{M-m}}{\sqrt{M}-\sqrt{M-m_0}}=-k_1t$$

式中，m_0，M，ξ_1 和 k_1 为参数；“±”和“∓”中的上面的符号，相应于微生物生长过程的增长相；而下面的符号相应于微生物生长过程的减小相。

种群构件结构及与环境因子的多元分析模型

刘玉成，攀云祥，苏杰等：缙云山大头茶幼苗种群构件结构及与环境因子的多元分析。植物生态学报，1996，20(4)

（1）关系系数 $\xi_{ij}(k)$ 模型：

$$\xi_{ij}(k)=\frac{\min_i\min_k\Delta i(k)+\rho\max_i\max_k\Delta i(k)}{\Delta i(k)+\rho\max_i\max_k\Delta i(k)}$$

（2）关联度 γ_{ij} 模型：

$$\gamma_{ij}=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\xi_{ij}(k)$$

生态系统信息综合模型

Ulanowicz R E. Abarca-Arenas L G：生态系统结构和功能的信息综合．Ecological Modelling, 1997, 95

（1）生态系统迁移的聚集过程中，不确定的内在规律的合适量度是流动多样性——D_f：

$$D_f=-k\sum_{k=1}^{m}\frac{T_k}{T}\lg\frac{T_k}{T}$$

式中，T_k 是在被观察到的总数为 T 的 m 中的第 k 个流

量；k 是标量常数。

(2) 平均的交互信息——I：

$$I = k\sum_i\sum_j (T_{ij}/T)\lg\left(T_{ij}T/\sum_q T_{iq}\sum_r T_{rj}\right)$$

式中，T_{ij} 是从组分 i 到 j 的流量。

(3) Kullback-Leibler 指数：

$$I = k\sum_i\sum_j (T_{ij}/T)\lg(T_{ij}B^2/B_iB_jT)$$

式中，B_i 是类别 i 的单位生物量；B 是系统的总单位生物量。

(4) 包括优势种的单位生物量定义为：

$$A = \sum_i\sum_j T_{ij}\lg(T_{ij}B^2/B_iB_jT)$$

营养循环分析模型

Comins H N：营养循环动力学分析，用于预测营养有限森林生态系统的可持续性和 CO_2 反应 Ecological Modelling, 1997, 99

(1) 净初级碳产品 G 计算公式：

$$G = \phi_0\varepsilon_0\omega R(c_a)E(v_f)[1-\exp(k\sigma C_f/\omega)]$$

式中，ϕ_0 是光合有效辐射(R_{pa})；ε_0 是已知平均叶面温度和参照 CO_2 浓度时潜在的光合有效辐射利用率，ω 是生物量中碳含量；$R(c_a)$ 描述了对周围环境的 CO_2 浓度 c_a 的 P_{np} 反应；$E(v_f)$ 是叶子中 N:C 比率对光合作用限制的因子；k 是辐射消光系数；σ 是物种的叶片面积；C_f 是每平方米叶子含碳量。

(2) 植物氮吸收率 U 如下所示：

$$U = G[(\lambda_f\eta_f + \rho\lambda_r\eta_r + \eta_w J_w(v_f))]$$

式中，λ_f 和 λ_r 分别是在老叶和根中氮被固定的部分；η_f 和 η_w 是树叶、树枝、茎和结构根中分配的部分；ρ 是从根到叶的 N:C 比率；$J_w(v_f)$ 是输入到心材中当前的 N:C 比率；η_r 是粗糙和精细根的分配比例。

蝗虫能流参数的计算——第二性生产力 P

邱星辉，李鸿昌：大针茅草原蝗虫的群落结构和能流研究，生态学报，1997，17(1)

$$P = M + \sum\frac{(N_i + N_{i-1})(W_i - W_{i-1})}{2}$$

式中，M 为首次取样蝗虫的能量生物量；N_i 为蝗虫在时间 i 的个体数；W_i 为蝗虫在时间 i 的平均体重。

三种寄生物与一种寄主的系统模型

张学武，古德祥：三种寄生物与一种寄主的系统模型研究 生态学报，1997，17(1)

红圆蚧与它的 3 种寄主(AM、AL、FC)相互作用的系统模型：

$$H_{n+1} = \lambda H_n(sf_1f_2 + tf_2f_3 + uf_3)$$
$$P_{n+1} = H_n s(1-f_1)$$
$$Q_{n+1} = H_n(sf_1 + t)(1-f_2)$$
$$R_{n+1} = H_n(u + tf_2)(1-f_3)$$
$$f_1(P_n) = \exp(-aP_n)$$
$$f_2(Q_n) = \exp(-bQ_n)$$
$$f_3(R_n) = \exp(-cR_n)$$
$$\lambda = \exp(r_m)$$

式中，λ 为红圆蚧的周限增长率；r_m 为内禀增长率；P，Q，R 分别为 AL 蜂、AM 蜂、EC 蜂的密度；a,b,c 分别为它们的寻找效率；s 为只适合于 AM 蜂和 AL 蜂攻击，蚧虫大小在 0.55mm² 以上；t 为只适合于 AM 蜂和俄 EC 蜂攻击，蚧虫大小在 0.39 mm² 至 0.55 mm² 之间；u 为只适合 EC 蜂攻击，蚧虫大小在 0.39 mm² 以下。

群落的优势度模型

魏忠诚，安继尧，虞以新：中国边境地区蚊虫群落的研究 生态学报，1997，17(3)

(1) 优势度指数 I 模型：

$$I = \frac{n_i}{N}$$

(2) 优势度集中指数 C 模型：

$$C = \sum\left(\frac{n_i}{N}\right)^2$$

式中，n_i 为 i 物种的数量；N 为全部种的种群数量。

群落高度及结构分析模型

陈晓德，李旭光，王金锡：绵阳官司河流域长江防护林的群落高度及结构分析 植物生态学报，1997，21(4)

(1) 群落高度级个体数结构动态统计：

种群整体失稳率 V 模型：

$$V=\frac{1}{\sum_{n=1}^{K-1}N_{o.n}}(N_{o.1}-N_{o.k})$$

式中，$N_{o.n}$为第 n 高度级种群个体数。

(2) 群落高度级盖度结构动态统计：

1) $N\rightarrow N+1$ 级盖度波动速率 $H_{n\mathrm{CfR}}$ 模型：

$$H_{n\mathrm{CfR}}=\frac{|C_n-C_{n+1}|}{\max(C_n,C_{n-1})}$$

式中，C_n 为 n 级盖度值；$\max(C_n,C_{n+1})$ 为两项最大值。

2) 群落垂直空间盖度分布波动度 C_{CfR} 模型：

$$C_{\mathrm{CfR}}=\frac{1}{K-1}\sum_{n=1}^{K-1}H_{n\mathrm{CfR}}$$

(3) 群落高度级种群结构动态模型：

1) 种类对级的分享度 $H_{n\mathrm{ssd}}$ 模型：

$$H_{n\mathrm{ssd}}=\frac{f_n}{\sum_{n=1}^{k}f_n}100\%$$

式中，f_n 为某一高度级的种数；$\sum_{n=1}^{k}f_n$ 为群落总的种频次

2) 种类对群落整体的分享度 C_{ssd} 模型：

$$C_{\mathrm{ssd}}=\frac{1}{K}\cdot\sum_{n=1}^{k}H_{n\mathrm{ssd}}$$

森林群落的种-多度关系模型

马克平，刘灿然，于顺利等：北京东灵山地区植物群落多样性的研究 Ⅲ. 几种类型森林群落的种-多度关系研究. 生态学报，1997，17(6)

(1) 种-多度分布模型：

1) 对数级数分布模型：

$$E_r=\frac{\alpha X^r}{r}\qquad(r=1,2,\cdots)$$

式中，E_r 为具有 r 个个体的期望种数；X 为与样本有关的参数，且 $0<X<1$；α 为不受样本大小影响的参数，它反映了群落的内在性质，且 $\alpha>0$。

2) 对数正态分布模型：

$$P(x)=A\exp\left[-\frac{x-\alpha^2}{2\sigma^2}\right]$$

式中，x 为从所考虑的某"倍程"到原点的距离；σ 为不受样本大小影响的参数；α 为与样本大小有关的参数。

3) 负二项分布模型：

$$q_r=\frac{\frac{\Gamma(k+r)}{r!\Gamma(k)}\left[\frac{P}{1+P}\right]^r}{1+P^k-1}\qquad(r=1,2,\cdots)$$

式中，k 和 P 为两个参数；q_r 为一个种可以被样本中的 r 个个体代表的概率。

4) 几何分布模型：

$$q_r=\frac{[P/(1+P)]^{r-1}}{1+P}\qquad(r=1,2,\cdots)$$

(2) 种重要性顺序-多度表模型：

1) "分割线段"模型：

$$A_i=A_m\sum_{j=i}^{s}\frac{1}{j}$$

式中，A_i 为第 i 个最富有种的理论多度；A_m 为该模型中惟一的一个参数，它是所有种的平均多度；S 为观察的总种数。

2) 生态位优先占领模型：

$$A_i=A_1k^{i-1}$$

式中，A_i 为 S 个种中第 i 个最富有种的多度；A_1和k 为两个参数；A_1 为拟合的最富有种的多度。

3) Zipf 模型和 Zipf-Mandelbrot 模型(ZMM)：

$$A_i=A_1i^{-r}$$

$$A_i=A_1(i+\beta)^{-r}$$

式中，β，r 为参数。

群落空间格局分析模型

贺达汉，郑哲民，顾才东等：荒漠草原蝗虫群落空间格局的研究. 生态学报，1997，17(6)

(1) 相关系数 r 模型：

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sum_{i=1}^{n}(x-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}(y-\bar{y})^2}$$

式中，x，y 表示某种蝗虫在不同样点中出现的个体数；$\bar{x}$，$\bar{y}$ 为其平均数；n 为样点数。

(2) 混合度指数 F 模型：

$$F=\frac{\sum_{j}^{n}\sum_{li=i+1}^{S}a_{i+1}(i+1)n}{\sum_{j}^{j}\sum_{li=1}^{S}a_{i}n}$$

$$(i=1,2,\cdots,S)$$

式中，a 为每样方中蝗虫出现的频次；i 为每样方中出现蝗虫的种类数；n 为每样方中出现蝗虫的个体数；j 为抽样数。

误差平方和的求解及其来源的识别模型

Paruelo J M, Jobbágy E G, Sala O E et al：温带草地和灌木林地生态系统的功能和结构趋同 Ecological Applications, 1998, 8(1)

(1) 预定误差的平方和(S_{SPE})：

$$S_{SPE}=\sum_{n}(o_{bs_i}-p_{re_i})^2$$

式中，o_{bs_i} 和 p_{re_i} 分别是指观测值和预测值；n 是观测点的数量。

(2) 泰勒的局部非均衡系数(U)：

1) 与观测值和预测值之间的平均差相关的部分可表达为：

$$U_{b_{ias}}=[n(O_{BS}-P_{RE})^2]/S_{SPE}$$

2) 与固定模型的斜率(β) 和 1:1 的线性关系有关的部分可表达为：

$$U_{\beta=1}=[(\beta-1)^2\sum_{n}(p_{re_i}-P_{RE})^2]/S_{SPE}$$

3) 与不可解释的变异数有关的部分可表达为：

$$U_{e}=\sum_{n}(e_{st_i}-o_{bs_i})^2/S_{SPE}$$

式中，O_{BS} 和 P_{RE} 分别代表观测值和预测值的平均数；e_{st} 是从固定衰退模型得到的估计值。这些系数可用于识别预定误差的不同源。

森林生态系统的能量平衡方程

吴厚水，刘慧屏，黄大基等：鼎湖山自然保护区 3 种群落的能量流和能量利用效率 生态学报，1998，18(1)

$$Q=AQ+F+H+LE+B+r+D+G+b$$

式中，森林生态系统的能量输入是太阳总辐射 Q；输出则包括以辐射形式消耗的 AQ(反射辐射)和 F(有效辐射)；以热量形式消耗的 H(显热)，LE(潜能)、B(土壤热通量)和 r(吸收能)；以植物有机质形式消耗的 H(枯枝落叶能)和 G(森林动物摄食能)，最终储存的是森林生物量增长能 b

Chikugo 模型

赵士洞，罗天祥：区域尺度陆地生态系统生物生产力研究方法 资源科学，1998，20(1)

$$P_{npm}=0.29R_{n}e^{-0.216I_{rd}^{2}}$$

式中，P_{npm} 为最大净第一性生产力；R_n 为年净辐射；I_{rd} 为辐射干燥度。

杂草群落中杂草生态位模型

郭水良，李扬汉，赵铁桥：浙江金华地区小麦-杂草群落中杂草生态位的研究 植物生态学报，1998，22(1)

(1) 杂草的重要值 I_V 模型：

$$I_V=\sum_{i=1}^{7}A_iB_i/5C$$

式中，A_i 为杂草在第 i 优势度级的代表值；B_i 为杂草在第 i 优势度级出现的样方数；C 为该样点中的样方数。重要值在 0~1 之间。

(2) 农田中杂草的生态位宽度 B 模型：

$$B=\frac{1}{S\sum_{i=1}^{s}\left(IV_i\Big/\sum_{i=1}^{s}IV_i\right)}$$

式中，S 为样点数；IV_i 为该种杂草在第 i 样点中的重要值。

空间模式模型

Pastor J, Dewey B, Moen R et al：美国密歇安州罗埃尔岛上驼鹿-森林-土壤生态系统的空间模式 Ecological Applications, 1998, 8(2)

(1) 表现短程自相关的属性可用由短距离分开的各点间的较低的方差来证明，但是方差渐近地随着各抽样点间的距离的增加而增加。这个模型表明了同类缀块的存在，尽管他们自身在景观内是随机分布的。常用于这样模式的方程就是所谓的球形模型：

$$\gamma(h)=C[1.5h/a-(h/a)^3]+\varepsilon \qquad (h\leqslant a)$$

$$\gamma(h)=C \qquad (h\geqslant a)$$

式中，$\gamma(h)$是指随距离 h 的相似变化；C 是$\gamma(h)$的渐近线；a 是指在 C 时 h 的值；ε（有些地方也称为贵金属)是指 y 轴的截距或在间距离小于抽样点间的最短距离时与空间变化无关的系数。

(2) 当缀块均匀分布时，高级的空间分布模式就

会出现，其等式为：

$$\gamma(h)=\bar{\gamma}+Ae^{kh}\sin(\omega h+\beta)$$

式中，A 是 $\bar{\gamma}$ 的变化幅度；k 是指幅度随距离 h 变化的速度；ω 是频率；β 是相位。

落叶分解率及其氮损失的计算公式

Biondini M E, Patton B D, Nyren P E：美国北方混生草原的放牧强度与生态系统过程 Ecological Applications, 1998, 8(2)

（1）落叶分解率的计算公式：

$$分解率=\frac{[OM_pS_p-(S_r-C_p)OM_r]100}{OM_pS_p}$$

式中，OM_p 是指原生的、专设的样本的无灰有机质数量；OM_r 是指回收的样本的无灰有机质数量；C_p 是空瓶放置时的质量；C_r 是空瓶回收时的质量；S_p 是样品放置时的质量；S_r 是样品回收时的质量。

（2）由于分解作用，氮损失的百分比可由下式计算：

氮损失的百分比=

$$\frac{\{OM_pS_pN_p-[S_r-(C_r-C_p)]OM_rN_r\}100}{OM_pS_pN_p}$$

式中，N_p 是最初样品中氮的含量；N_r 是回收样品中氮的含量。

结合指数

彭明春，党承林：云南鸡足山元江栲群落和高山栲群落的植物种间结合研究．生态学报，1998，18(2)

（1）联结指数 A_i：

$$A_i=\frac{2(ad-bc)}{(a+b)(b+d)+(a+c)(c+d)}$$

（2）X^2 统计量：

$$X^2=\frac{(|ad-bc|-M/2)^2M}{(a-b)(b+d)(a+c)(c+d)}$$

（3）点相关系数 R_p：

$$R_p=\frac{ad-bc}{(a+b)(b+d)(a+c)(c+d)}$$

（4）相关系数 $R_{i,n}$：

$$R_{i,n}=\frac{\sum_{k=1}^{m}(X_k-\bar{X})(Y_k-\bar{Y})}{\sqrt{\sum_{k=1}^{m}(X_k-\bar{X})^2\sum_{k=1}^{m}(Y_k-\bar{Y})^2}}$$

式中，a 为含有 A，B 两个种的样方数；b 为不含 A 种只含 B 种的样方数；c 为只含 A 种不含 B 种的样方数；d 为既不含 A 种又不含 B 种的样方数；$M=a+b+c+d$ 为样方总数；X_k、Y_k 分别为第 k 个样方中物种 A 和物种 B 的重要性指标；$\bar{X}$，$\bar{Y}$ 为别为 X_k 和 Y_k 的平均值。

鸟类丰度及其指标共位群的预测方程

Germaine S S, Rosenstock S S, Schweinsburg R E et al：亚历桑那州图森市区及郊区内繁殖的鸟儿与生境和住区发展之间的关系，Ecological Applications, 1998, 8(3)

（1）非本地鸟类种群丰度的预测方程(NN-R)：

$$\text{NN-R}=0.545+0.196H_{\text{DEN}}+0.026P_{\text{CTP}}+0.009U_{\text{OE}}-0.004U_{\text{SV}}$$

式中，H_{DEN} 是指房屋密度；P_{CTP} 是指土地的铺面面积；U_{OE} 是指城市中的外来植被；U_{SV} 是指丘陵桑罗伦植被。

（2）本地繁殖鸟类丰度的预测方程(B-R)：

$$\text{B-R}=10.803-0.466H_{\text{DEN}}+0.023U_{\text{SV}}-0.001D_{\text{ISR}}$$

式中，D_{ISR} 是指至未受干扰的低湿地的距离。

（3）本地繁殖鸟的指标共位群的预测方程(IG-R)：

$$\text{IG-R}=1.584-0.200H_{\text{DEN}}-0.010P_{\text{CTP}}-0.008U_{\text{OE}}+0.003U_{\text{SV}}$$

光合作用活性辐射(PAR)吸收值计算公式

Asner G P, Wessman C A, Archer S：陆地生态系统中光合作用的活性辐射(PAR)吸收的尺度依赖．Ecological Applications, 1998, 8(4)

（1）P_{AR} 被植物吸收(f_{PAR})和截留(f_{IPAR})的部分：

$$f_{IPAR}=\frac{P_{AR_i}-P_{AR_t}}{P_{AR_i}}$$

式中，P_{AR_i} 是指在树冠顶部入射的 P_{AR}；P_{AR_t} 是指 P_{AR} 从林冠底部透出的部分。

$$f_{PAR}=\frac{P_{AR_i}-P_{AR_t}-P_{AR_r}}{P_{AR_i}}$$

式中，$P_{AR_s} = P_{AR_{s(canopy)}} + P_{AR_{s(bottom)}}$。

P_{AR_s}包括指从林冠散射到空气中损失值 $P_{AR_{s(canopy)}}$ 以及由土壤或落叶表面散射到空气中但未被林冠吸收的光子 $P_{AR_{s(bottom)}}$。

(2) 每个种的叶、茎和落叶的光合作用活性辐射的吸收值($f_{APAR_{tissues}}$)可用下式计算：

$$f_{APAR_{tissues}} = \frac{\sum_{\lambda=400}^{700}(1.0 - \rho_{\lambda} - \tau_{\lambda})}{301}$$

式中，ρ_{λ} 是指波长为 λ 的半球反射系数；τ_{λ} 是指半球透射率。

植物丰度公式

Augustine D. Frelich L E. Jordan P A：在有蹄类动物放牧系统中，两个交替稳定状态的证明 Ecological Applications, 1998 8(4)

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} = G(V) - c(V)H$$

式中，V 是植物丰度；$G(V) = rV(1 - V/K)$ 是逻辑推理增长函数，r 是内在增长率，K 是承载力，$c(V)$ 是食草动物的函数响应；H 是一个恒定的食草动物密度。自然系统中通常有两种一般形态，这就预示着各不相同的植物和食草动物之间的均衡模式的差异可以是很大的，类型Ⅱ的函数响应可描述为：$c(V) = cV/(1 + chV)$；类型Ⅲ的函数响应可描述为：$c(V) = V^2/(1 + chV^2)$，c 和 h 是参数。

已知相对于 Laportea 可用性来说，鹿的类型Ⅱ函数响应，那么植物丰度的离散方程如下：

$$V_{t+1} = V_t\left\{\exp\left[r\left(1 - \frac{K}{V}\right) - \frac{cH}{1 + chV}\right]\right\}$$

式中，V_t 是 t 年份的 Laportea 密度。

水化学淋溶量 $L_1^{(1)}(t)$ 模型

陈步峰，曾庆波：热带山地雨林生态系统的水分生态效应——冠层淋溶，水化学贮滤 生态学报，1998，18(4)

$$L_1^{(1)}(t) = \left[L_1^{(0)} - \frac{b}{a}P_1^{(1)}(t)\right]e^{-at} + \frac{b}{a}P_1^{(1)}(t)$$

$$P_1^{(1)}(K) = \sum_{m=1}^{K} P_1^{(0)}(m)$$

式中，$L_1^{(0)}$ 为测定原始淋溶量序列；$P_1^{(0)}$ 为降水量因子序列；a 为发展变化系数；b 为因子对淋溶变化的影响系数

热带山地雨林生态系统碳平衡模型

李意德，吴仲民：尖峰岭热带山地雨林生态系统碳平衡的初步研究 生态学报，1998，18(4)

(1) 森林群落生物量：

大型木质藤本植物的生物总量 W 模型：

$$W = 0.113063(D^2L)^{0.706095}$$

式中，D 为藤粗度；L 为藤长度

(2) 森林群落的呼吸消耗量：

木质器官呼吸量 R 模型：

$$R = \left[W(3-\alpha)/\left(D_{\max}^{3-\alpha} - D_{\min}^{3-\alpha}\right)\right] \times \left\{[A/(3-\alpha+B)]D^{3-\alpha-B}\Big|_{D_{\min}}^{D_{\max}}\right\}$$

(3) 森林群落第一性生产力的初步计算：

净生产量 P_n 模型：

$$P_n = \Delta B + L + Ig + Exp - \mathrm{Im}p$$

式中，ΔB 为两次调查测定期间内的生物量净增量；L 为凋落物量；Ig 为第二性生物的消耗量；Exp 为森林干物质的输出量；$\mathrm{Im}p$ 为输入量。

(4) 森林生态系统中的 C 储量：

土壤各土层的碳含量 C_C 模型：

$$C_C = 8.21665H^{-0.865168}$$

式中，H 为土层深度。

植物群落的结构特征及其分布格局模型

王文颖，王启基，邓自发：青海海北地区高山蒿草草甸植物群落的结构特征及其分布格局 植物生态学报，1998，22(4)

(1) 重要值模型：

$$\text{重要值} = \text{相对频度}(\%) + \text{相对盖度}(\%) + \text{相对密度}(\%) + \text{相对株高}(\%) + \text{项生物量}(\%)/5$$

(2) 生态为宽度 B_i 模型：

$$B_i = \frac{1}{\sum P(i,j)^2}$$

式中，$P(i,j)$ 为第 i 种在 j 资源位上的相对多度

(3) 不同植物群落种-多度分布模型：

$$S(R) = S_0 e^{-a^2R^2}$$

式中，$S(R)$ 为第 R 个倍频程种的数目；S_0 为众数倍频程上种数的估计值；e 为自然对数；a 为参数。

植物种群空间分布的点格局分析模型

张金屯：植物种群空间分布的点格局分析 植物生态学报，1998，22(4)

（1）种群分布格局分析：

二次特征结构模型：

$$K(t) = \lambda^{-1}$$

$$\hat{K}(t) = \frac{A}{n_2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{1}{W_{ij}}It(u_{ij}) \quad (i \neq j)$$

式中，$\hat{K}(t)$ 为协方差 k 的估计值；λ 为密度，即单位面积上的平均点数；t 可以为>0 的任何值；u_{ij} 为两个点 i 和 j 之间的距离；当 $u_{ij}>t$ 时，$It(u_{ij})=0$；$u_{ij}\leqslant t$ 时，$It(u_{ij})=1$；当 $u_{ij}\leqslant t$ 时，$It(u_{ij})=1$；W_{ij} 为以点 i 为圆心，以 u_{ij} 为半径的圆周长在面积 A 中的比例，其为一个点(植株)可被观察到的概率；n 为总点数(植物个体数)；A 为样地面积。

（2）种间关系分析——多元点格局分析模型：

$$\hat{K}_{12}(t) = \left(\frac{A}{n_1 n_2}\right)\sum_{i=1}^{n_1}\sum_{j=1}^{n_2}\frac{1}{W_{ij}}It(u_{ij})$$

式中，n_1 和 n_2 分别为种 1 和种 2 的个体数(点数)；i 和 j 分别代表种 1 和种 2 的个体；其他同上。

木本和草本植物动态模拟模型

Grant WE, Hamilton W T, Quintanilla E：半干旱草原农业生态系统的可持续性：Texas 南部和 Mexico 西北部的 Rio Grande 平原木本植物的模拟管理．Ecological Modelling,1999,124

（1）木本植物子模型：

木本植物(W, % 覆盖率)的动态方程可表述如下：

$$W_{t+1} = W_t + P_{\mathrm{npw}} - L_{\mathrm{w}}$$

式中，P_{npw} (%·mon^{-1})是净初级生产力；L_{w}(%·mon^{-1})是损失量。

$$P_{\mathrm{npw}} = P_{\mathrm{npw_{max}}}W[(W_{\max}-W)/W_{\max}]R_{P_{\mathrm{npw}}}$$

式中，$W_{\max}$ 是本区域在 25 年的计划范围内能达到的最大覆盖率(65%)；$P_{\mathrm{npw_{max}}}$ 是处理后能达到的覆盖率的最大增长率(7.5%·mon^{-1})；$R_{P_{\mathrm{npw}}}$ 是在某种假定的情况下木本植物重新生长的相对速率。

（2）草本植物子模型：

绿色草本植物(G_{h}, 烘干净重 kg·hm^{-2})干草本植物(D_{h}, 烘干净重 kg·hm^{-2}) 的动态方程可表述如下：

$$G_{\mathrm{h}_{t+1}} = G_{\mathrm{h}_t} + P_{\mathrm{nph}} - S - G_{\mathrm{lg}} - F_{\mathrm{lg}}$$

$$D_{\mathrm{H}_{t+1}} = D_{\mathrm{H}_t} + S - D - G_{\mathrm{ld}} - F_{\mathrm{ld}}$$

式中，P_{nph} 是净初级生产力；S 是死亡率；D 是分解率；G_{lg} 和 G_{ld} 分别是绿色植物与干植物的采食损失；F_{lg} 和 F_{ld} 是火灾损失；所有量的单位都是(kg·hm^{-2}·mon^{-1})。

净初级生产力可表述为：

$$P_{\mathrm{nph}} = P_{\mathrm{nphcc}}P_{\mathrm{PT}}I_{\mathrm{NPP}}$$

式中，P_{nphcc} 是单位降水的净初级生产率(烘干净重 kg·hm^{-2}·cm^{-1}·mon^{-1})；P_{PT} 是月降水量；I_{NPP} 是由于某种管理方案产生的后效应导致的净初级生产力增长的比例。

支持一头奶牛所需草原英亩数(A_{PC})的估计方程：

$$A_{\mathrm{PC}} = 2.47/[(0.25A_{\mathrm{NPP_H}})/(F_{\mathrm{RC}}\cdot 12)]$$

式中，$A_{\mathrm{NPP_H}}$ 是上一年草本植物每英亩总的年净初级生产力(烘干净重 kg·hm^{-2}·a^{-1})；F_{RC} 是一头奶牛所需的植物量(353.8 烘干净重 kg·mon^{-1})。

近岸海洋生态系统的浮游生物氮循环模型

Murray A G, Parslow J S：一个近岸海洋生态系统的简单模型的替代公式的分析．Ecological Modelling, 1999, 119

（1）最简单的浮游生物模型只包含两个变量：无机溶解氮(DIN, N)和浮游植物(P)，相应的方程是：

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t} = \frac{\mu_{\mathrm{Pl}}NP}{N+K_{\mathrm{N}}} - m_{\mathrm{P}}P - C_{\mathrm{Z}}P^{n}$$

$$\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t} = I_{\mathrm{x}} + fC_{\mathrm{Z}}P - \frac{\mu_{\mathrm{Pl}}NP}{N+K_{\mathrm{N}}}$$

式中，μ_{Pl} 是浮游植物生长率；K_{N} 是氮的浮游植物生长半饱和浓度；m_{P} 是浮游植物的自然死亡率；C_{Z} 是采食损失参数，采食损失可以是正比于 P 或是正比于 P 的平方；I_{x} 是总的溶解无机氮负荷；f 是采食损失以 DIN 形式在水体中循环的比例；由于自然死亡而损失的氮则全部输入到泥沙中。

（2）如果在模型中明确地反映出浮游动物的生物量，则模型修正为：

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t} = \frac{\mu_{\mathrm{Pl}}NP}{N+K_{\mathrm{N}}} - m_{\mathrm{P}}P - GZ$$

$$\frac{dN}{dt}=I_x+f_m m_Z Z^n+f_g(1-e)GZ-\frac{\mu_{PI}NP}{N-K_N}$$

$$\frac{dZ}{dt}=GeZ-m_Z Z^n$$

式中，Z 为浮游动物的生物量；e 为浮游动物总的生长效率；m_Z 为浮游动物死亡参数；比例常数 f_g 是浮游动物死亡损失中以无机溶解氮形式在水体中循环的部分；而其余部分则输入到泥沙，其死亡损失项可以正比于 Z，也可以正比于 Z 的平方；函数 G 表示动物的采食函数变化，函数 G 的选择可以有以下 4 种形式：

① 线性公式：$G=cP$，c 为固定清除率。

② $G=\min[cP, g_{max}]$。

③ 双曲函数：$G=\frac{cP}{1-cP/g_{max}}$，$g_{max}$ 为饱和采食率。

④ 具有最小采食量的双曲函数：$G=\frac{c(P-P_t)}{1-c(P-P_t)g_{max}}$，$P_t$ 为最小采食量阈值。

森林生态系统净初级生产力模拟模型

Kimmins JP, Mailly D, Seely B：模拟森林生态系统净初级生产力：FORECAST 中的混合模拟方法。Ecological Modelling, 1999, 122

(1) 从历史生物测定数据导出总的净初级生产力：

每年的总的净初级生产力基于以下方程：

$$T_{NPP_t}=\Delta t_{biomass}+\Delta t_{ephemerallitterfall}+\Delta t_{mortality}$$

式中，$\Delta t_{biomass}$=在时段 t 内某个物种所有的生物成分量的变化；$\Delta t_{ephemeral\ litterfall}$=在时段 t 内掉落的所有短暂性生物组织的量之和；$\Delta t_{mortality}$=在时段 t 内死亡的个体植物的生物量。

(2) 年可能生长率(G_{ap})：

叶面营养生产率(E_{fn})为：

$$E_{fn_t}=T_{NPP_t}/N_{f_t}$$

式中，N_{f_t} = foliage biomass$_t$ × foliar N concentration 为给定物种在时刻 t 的总叶营养含量(kg·hm^{-2})。

G_{ap} 是遮蔽修正叶面营养效率(SCFNE)的函数，它可对每个植物种类分别进行计算，即：

$$G_{ap_{(t+1)}}=S_{cfn_t}E_{scfn_t}$$

式中，$G_{ap_{(t+1)}}$= 某个给定的物种在下一个时段内的年可能生长率；$S_{cfn_t}=\sum_{i=1}^{n}(F_{n_i}P_{lsc_i})$，$F_{n_i}$ 是在树冠层中以 1/4m 为间距分层时第 i 层叶面营养成分量，P_{lsc_i} 是在第 i 层的光照水平相关的光合作用光照饱和曲线值，n 是树冠分层的层数；S_{cfn_t} 是在时段 t 中修正叶营养含量；$E_{scfn_t}=\frac{T_{NPP_t}}{S_{CFN_t}}$，$E_{scfn_t}$ 是时段 t 中修正叶营养效率。

(3) 模拟生态系统中营养成分的循环：

某个给定物种的年吸收营养需要可用质量平衡方法来定：

$$U_{di}=G_{api}C_{ei}-(C_{ii}+C_{ui})-L_i$$

式中，G_{api} 是物种 i 的年可能生长率；C_{ei} 是物种 I 的新的生物量的平均营养成分浓度 (%)；C_{ii} 是物种 i 从内部循环中获取的年净营养成分(kg·hm^{-2})；C_{ui} 是物种 i 通过树冠直接从降水或透过植被的降水中吸收的营养成分(kg·hm^{-2})；L_i 是总的叶面年营养成分溶淋率(kg·hm^{-2})。

$$N_{api}=T_{an}RO_i$$

$$RO_i=B_{fri}/B_{mfri}$$

式中，N_{api} 是物种 i 可用营养成分的数量(kg·hm^{-2})；T_{an} 是当前时段可用营养成分储备的总的大小(kg·hm^{-2})；B_{fri} 是物种 i 当前时段的细根的生物量(kg·hm^{-2})；B_{mfri} 是给定位置物种 i 的最大细根的生物量(kg·hm^{-2})。

$$U_{ai}=\min(U_{di}, N_{api})$$

式中，U_{ai} 是物种 i 年实际营养成分吸收率。

水生生态系统模型(CASM 2.0)

Bartell S M, Lefebvre G, Kaminski G et all：Québec 地区河流、湖泊和水库生态风险估计的生态系统模型．Ecological Modelling, 1999, 124

(1) 生产者的生物能方程：

$$dB_i/dt=p_{ho}-r_{es}-s_{in}-nat_{mortality}-g_{ra}$$

或

$$\frac{dB_i}{B_i dt}=P_{m_i}(h(T)\left\{\beta\exp\left[\frac{I}{I_{si}}\exp(-0.1\sum_n B_i-2.0)\right]-\exp\left(\frac{I}{I_{si}}\right)\right\}\min(N/kN_i+N, P/kP_i-P, S/kSi_i+S)-r_i h(T)-(s_i+m_i)-\sum h(T)B_jC_{ij}w_{ij}h_{ij}B_i/(B_j+\sum w_{ij}a_{ij}h_{ij}B_i)$$

式中，B_i 是种群 i 的生物量(g·cm^{-2})；P_{m_i} 是最大光合

作用率(d^{-1})；$h(T)$ 是光合作用的温度影响因子，I 是入射光强，($Eins·m^{-2}·d^{-1}$)；I_{li} 是种群 i 的饱和光强($Eins·m^{-2}·d^{-1}$)；N，P，Si 分别是无机态的 N、P 和 Si 的溶解浓度($g·L^{-1}$)；kN_i，kP_i，kSi_i 是种群 i 的相应的半饱和浓度($g·L^{-1}$)；r_i 是呼吸作用率(d^{-1})；s_i 是沉淀率(d^{-1})；m_i 是死亡率(d^{-1})。

(2) 消费者的生物能方程：

$$dB_i / dt = c_{on} \quad r_{es} - e_{xc} - e_{gc} - nat_{mortality} - (spe_{dynamic\ action}) - p_{re}$$

或

$$\frac{dB_i}{B_i dt} = \sum Cm_i [h(T) w_{ij} a_{ij} h_{ij} B_j / (B_i + \sum w_{ij} a_{ij} h_{ij} B_i)] - r_i h(T) - (u_i + f_i - m_i + r_{sda_i}) - \sum Cm_j [h(T) w_{ij} a_{ij} h_{ij} B_j / (B_j + \sum w_{ij} a_{ij} h_{ij} B_i)]$$

式中，B_i 是消费种群 i 的生物量 ($g·cm^{-2}$)；cm_i 是最大消费率(d^{-1})；$h(T)$ 是温度影响因子；w_{ij} 是被捕食种群 j 的捕食参数；a_{ij} 是相对被捕食种群 j 的消化效率；h_{ij} 是处理效率；r_i 是呼吸作用率(d^{-1})；u_i 是排泄率(d^{-1})；f_i 是分泌率(d^{-1})；m_i 是死亡率(d^{-1})；r_{sda_i} 是仅适用于鱼类的特定的动力行为(d^{-1})。

(3) 消费方程：

$$C_i = Cm_i h(T) B_i \frac{\sum_j (w_{ij} a_{ij} h_{ij} B_j)}{B_i + \sum_j (w_{ij} a_{ij} h_{ij} B_j)}$$

式中，C_i 是消费种群 i 的消费率(d^{-1})；Cm_i 是最大消费率(d^{-1})；$h(T)$ 温度对消费率的影响因子；B_i 是消费种群 i 的生物量 ($g·cm^{-2}$)；w_{ij} 是对被捕食种群 j 的捕食参数；a_{ij} 是相对被捕食种群 j 的消化效率(0~1)；h_{ij} 是处理效率；B_j 是被捕食种群 j 的生物量($g·cm^{-2}$)。

(4) 温度依赖性模型：

温度对光合作用、消费及呼吸作用的速率的影响可用下式确定：

$$h(T) = V^x \exp[x(1 - V)]$$

式中，$V=(T_m-T_o)$，T_m 定义了致死的上限温度及死亡率，同时 T_o 给定了最适宜温度；x 是等于 $\ln Q_{10}(T_m-T_o)$ 的一个标量，Q_{10} 这里取值为 2.0。

随机迹地模型

Laurance W F, Gascon C, Merona J M R：生境破坏对植物群落的影响预测. Ecological Applications, 1999, 9(2)

(1) 对随机分布的种来说，迹地生境的模式也是随机的，在这些条件下，任何未死的样方不含有特定种的可能性(Z)为：

$$Z = 1 - \frac{N}{Q}$$

式中，N 是指被讨论的种的群体大小，Q 是景观中样方的总数。

(2) 存活于做任意数量的迹地生境的一个种持续存在的可能性 P 为：

$$P = 1 - \prod_{i=0}^{Q\ R-1} \left(1 - \frac{N}{Q-i}\right)$$

式中，R 是在毁林过程中减少的样方数量。

(3) 对个体种 i 而言，假定其最终持续性为 P_i，则在任何迹地水平，一个共位群或群落的种群丰度期望值为：

$$S = \sum_{species} P_i$$

群落初级生产力 y

白永飞：降水量季节分配对克氏针茅草原群落初级生产力的影响. 植物生态学报, 1999, 23(2)

$$y = c + \int_0^t a(t) x(t) dt$$

式中，t 为时间；$x(t)$ 为 t 时刻的降水量；$a(t)$ 为 t 时刻的影响函数；c 为积分常数。

农田中净辐射的计算

申双和，周英，李秉柏等：冬小麦农田中净辐射的研究. 植物生态学报, 1999, 23(2)

(1) Monsi-Saeki 公式：

$$s'_y = s e^{-aF(y)}$$

式中，a 为单位有效遮光面积消光系数；s 和 s'_y 分别为冠顶和距地面 y 处的辐射强度；$F(y)$ 为由冠层表面向下累积的叶面积指数。

(2) 以 $\frac{2}{3}H$ 为界面，冠层上下两部分的净辐射 $B(z)$ 随高度变化模型：

$$B(z)=B_0e^{k_1z}, \quad \left[0,\ \frac{2}{3}H\right]$$

$$B(z)=B_{\frac{2}{3}H}e^{k_2(z-\frac{2}{3}H)}, \quad \left[\frac{2}{3}H,\ H\right]$$

式中，B_0、$B_{\frac{2}{3}H}$ 分别为地面和 $\frac{2}{3}H$ 处的净辐射；k_1、k_2 分别为冠层上下两部分的经验系数。

(3) 任一层次的净辐射模型：

$$B(j)=B_He^{-\tilde{k}A(j)}$$

式中，$B(j)$ 为第 j 层的净辐射(j=1,2,3)；B_H 为冠层顶部的净辐射；$\tilde{k}$ 为净辐射的消光系数；$A(j)$为第 j 层及其以上的叶面积指数。

最佳载畜量与营养循环模型

Mazancourt C, Loreau M, Abbadie L：最佳载畜量与营养循环：草地生态系统中大型草食动物的潜在影响. Ecological Applications, 1999, 9(3)

(1) 拉门多氮循环模型：

$$\frac{dG}{dt}=uNG+aG-b_sG-d_sG-d_rG-cG$$

$$\frac{dH}{dt}=cG-d_hH$$

$$\frac{dD}{dt}=d_hH-l_dD-m_dD$$

$$\frac{dL}{dt}=d_sG-b_lL-d_lL$$

$$\frac{dO}{dt}=(1-p_r)d_rG+I_O-d_OO$$

$$\frac{dM}{dt}=d_lL+p_rd_rG+d_OO-l_mM-m_mM$$

$$\frac{dN}{dt}=m_dD+m_mM+I_N-l_nN-uNG$$

式中，G 是指草地；N 是指土壤矿化氮的含量；L 是指枯草落叶；M 是土壤微生物；O 是指腐殖质；H 是食草动物；D 是指碎石；I_N 是指每年从降雨中输入的矿化氮；I_O 是指每年从降雨中输入的有机氮；l_n 是年度矿化氮的滤去率；u 是指每年每单位 G 和 N 的草吸收的矿化氮的速率；a 是指每年每单位 G 上根瘤菌对空气中氮的同化作用；b_s 是指每单位 G 的嫩芽的枯萎率；d_s 是指与芽死亡率相对应的植物死亡率；b_l 指每年落叶中氮的氧化率；d_l 指每年落叶中氮的分解率；p_r 是指直接被微生物分解的根中氮的死亡比例；d_O 是指每年腐殖质的分解率；m_m 是指微生物的年度有矿化率；l_m 是年度有机氮的滤去率；c 是指草食动物每年对草的消耗率；d_h 是指每年由草食动物引起的碎石产出率；m_d 是指草食动物碎石的年度矿化率；l_d 是指草食动物碎石的年度氮损失率。

(2) 草的均衡生物量 G^* 与初级生产力 Φ^*

$$G^*=\frac{S_n-l_nN^*}{m_p\beta_p-c\beta_h}$$

$$\Phi^*=uN^*G^*+aG^*=\frac{S_n-l_nN^*}{\beta_t}$$

式中，S_n 是指生态系统中氮的净输入量；l_nN^* 表示矿化氮的滤去值；m_p 是指植物的碎石产出率；β_p 是指氮沿种植路径损失的部分；β_h 是指氮沿两条路径所损失的部分。

(3) 在均衡值 Φ^* 达到 0 时的最大放牧强度 c_{max}：

$$c_{max}=\frac{u}{l_n}\left(S_n-l_n\frac{m_p}{u}\right)$$

物种丰度测量方法

Hellmann J J, Fowler G W：四种物种丰度测量方法的偏差、精确度和准确度. Ecological Applications, 1999, 9(3)

(1) 物种丰度的杰克莱芙估计量：

物种丰度的郁闭群系的、第一顺序的杰克莱芙估计量是：

$$J_n^1(S)=S_0+[r_{1(1)}(n-1)]/n$$

式中，S_0 是一个样本中物种的总量；$r_{1(1)}$是在一个严格的样方内发现的种的数量；n 是指样本大小。

(2) 第 k 顺序的杰克莱芙表达式是：

$$J_n^k(S)=S_0+\frac{1}{k!}\left[\sum_{j=1}^{k}r_{1(j)}\sum_{i=1}^{k}(-1)^{i-1}\binom{k}{i}(n-i)^k\frac{\binom{n-j}{i-j}}{\binom{n}{j}}\right]$$

(3) 物种丰度的郁闭引导估计：

$$B_n(S)=S_0+\sum_{j=1}^{S_0}(1-Y_j/n)^n$$

式中，Y_j 是指物种 j 所在的样方的数量。

(4) 物种丰度的期望值 $E(\hat{S})$：

$$E(\hat{S}) = \left(\sum_{i=1}^{n} \hat{S}_i\right) / n$$

式中，$\hat{S}_i$ 物种丰度的个体估计值；n 为样本数量。

旋转协方差测量模型

Clark K L, Gholz H L, Moncrieff J B et al：从对比强烈的佛罗里达生态系统看对于二氧化碳净交换量的环境控制. Ecological Applications, 1999, 9(3)

(1) 大多数的二氧化碳生态系统净流量使用旋转协方差技术来估算，树冠上方一个固定平面上的二氧化碳垂直旋转流量可以被估算为：

$$F_{\text{eddy}} = \overline{\rho_c' w'}$$

式中，F_{eddy} 是二氧化碳的旋转流量；$\rho_c' = \rho_c - \overline{\rho_c}$ 为与平均密度的即时偏离值；$w' = w - \overline{w}$ 为垂直风速与平均垂直风速的即时偏离值。

(2) 为了估计森林和大气之间的二氧化碳生态系统净流量，旋转协方差系统下的与空气柱里储存量变化的速率相关的流量也被包括进来了：

$$F_{CO_2} = F_{\text{eddy}} + F_{\Delta s}$$

式中，F_{CO_2} 是二氧化碳生态系统净流量；$F_{\Delta s}$ 是与二氧化碳储量变化相关的流量。

(3) 二氧化碳净流量以半小时为间隔，通过下式可以计算：

$$F_{\text{eddy}} = \beta \sigma_w \rho_{\text{air}} (C_{\text{up}} - C_{\text{down}})$$

式中，β 是一个没有维数的系数，我们假定它的值是0.56；σ_w 是垂直风速的标准偏差；ρ_{air} 是平均大气密度；$C_{\text{up}} - C_{\text{down}}$ 是平均每隔半小时测得的二氧化碳浓度的差值。

(4) 为了估计松柏生态系统中日间平均二氧化碳净交换量，我们建立了非线性回归方程：

$$F_{CO_2} = \frac{\alpha D_{\text{ppe}} F_{\text{sat}}}{\alpha D_{\text{ppe}} + F_{\text{sat}}} - R$$

式中，α 是表面的量子产量；D_{ppe} 是光合作用活跃时的光子流通密度；F_{sat} 是光辐射饱和时的二氧化碳净交换量；R 是当 $D_{\text{ppe}} = 0$ 时，平均二氧化碳净交换量。

(5) 为了从这两个生态系统中估计夜间平均二氧化碳净交换量，每半小时的夜间二氧化碳净交换率对空气和土壤温度做回归运算：

$$F_{CO_2} = a e^{bT}$$

式中，a 和 b 是回归系数；T 是平均每半小时空气或土壤的温度。

格氏栲林主要种群生态位模型

石金福、洪伟：格氏栲群落生态学研究——格氏栲林主要种群生态位的研究. 生态学报, 1999, 19(3)

(1) 生态位宽度模型：

$$B_{(sw)i} = -\frac{1}{\lg s} \sum_{j=1}^{r} P_{ij} \lg P_{ij}$$

式中，$B_{(sw)i}$ 为物种 i 的生态位宽度；P_{ij} 为物种 i 利用第 j 资源占它利用全部资源位的比例；s 为种群数；r 为资源位数。

(2) 生态位相似比例模型：

$$C_{ih} = \sum_{j=1}^{r} \min(P_{ij}, P_{hj})$$

式中，C_{ih} 为物种 i 与 h 的相似程度，且有：$C_{ih} = C_{hi}$，$C_{ih} \in [0,1]$；P_{ij}，P_{hj} 分别为物种 i 和物种 h 在资源为 j 上的重要值百分率。

(3) 生态位重叠模型：

$$L_{ih} = B_{(L)i} \sum_{j=1}^{r} P_{ij} P_{hj}$$

$$L_{hi} = B_{(L)h} \sum_{j=1}^{r} P_{ij} P_{hi}$$

$$B_{(L)i} = \frac{1}{r \sum_{j=1}^{r} P_{ij}^2}$$

式中，L_{ih} 为物种 i 重叠物种 h 的生态位重叠指数；L_{hi} 为物种 h 重叠物种 i 的生态位重叠指数；$B_{(L)}$ 为生态位宽度指数。

群落相似性指数模型

庄树宏，王克明，陈礼学：昆仑山老梯坡阳坡与阴坡半天然植被植物群落生态学特性的初步研究. 植物生态学报，1999，23(3)

$$IS_D = [D_c / 2(D_a + D_b + D_c/2)]100$$

$$IS_{RC} = [C_c / 2(C_a + C_b + C_c/2)]100$$

$$IS_{RIV} = [IV_c / 2(IV_a + IV_b + IV_c/2)]100$$

式中，IS_D，IS_{RC} 和 IS_{RIV} 分别表示以密度、相对盖度和相对重要值为计算基础的相似性指数；D_c，C_c 和 IV_c 分别表示两个群落共有种数目、相对盖度和相对重要

值的总和；D_a、C_a 和 IV_a 分别表示限定在阳坡群落中物种数量、相对盖度和相对重要值的总和；D_b、C_b 和 IV_b 分别表示限定在阴坡群落中物种数量、相对盖度和相对重要值的总和。

群落最小面积确定模型

邓红兵，吴刚等：马尾松-栎类天然混交林群落最小面积确定及方法比较．生态学报，1999，19(4)

（1）种-面积曲线模型：

$$S = \frac{aA}{1+bA}$$

$$S = \frac{c}{1+ae^{-bA}}$$

$$S = c - ae^{-bA}$$

$$S = a(1-e^{-bA})$$

式中，A 为面积；S 为 A 种出现的物种数；a、b、c 为待定参数。

（2）群落系数-面积曲线模型：

$$C_c = b + a\ln A$$

$$C_c = aA^b$$

$$C_c = a(\ln A + 5)^b$$

$$C_c = \frac{100}{1+ae^{-bA}}$$

$$C_c = 100 - ae^{-bA}$$

式中，C_c 为群落系数；A 为面积；a，b，c 为待定参数。

林地有效水分来源途径分析模型

孙长忠，黄宝龙：黄土高原"林分自创性"有效水分供给体系的研究．生态学报，1999，19(5)

（1）林外裸地水分收支平衡关系模型：

$$\Delta W = P_1 + RO_2 - RO_1 - E$$

式中，ΔW 为土壤储水增量；P_1 为降雨量；RO_2 为系统外径流输入量；RO_1 为系统内径流输出量；E 为地面蒸发量。

（2）林地水分收支平衡关系模型：

$$\Delta W_1 = P_2 - I - L_i + R_{Of_2} - R_{Of_1}$$

式中，ΔW_1 为林地土壤水分收入量；P_2 为降雨量；I 为林冠截留量；L_i 为枯落物截留量；R_{Of_2} 为系统外地表径流输入量；R_{Of_1} 为系统内地表径流输出量

群落结构指数

Bendell-Young L I, Bennett K E, Crowe A et al：受工业污水影响的湿地生态特征．Ecological Applications, 2000, 10(1)

（1）香农-威廉(Shannon-Wiener)异质性指数：

$$H' = Sp_j \ln p_j$$

（2）皮里欧斯(Pielous)平均指数：

$$J' = H'/\ln S$$

（3）索雷森(Sorensen)定量相似指数：

$$C_N = 2N_j/(N_a + N_b)$$

式中，S 是当前分类的总数；p_j 是每个分类的相对比例；N_j 是指两个地方共同分类中每一类的最低个体数的总和；N_a 是指位置 a 的个体总数；N_b 是指位置 b 的个体总数。

孤立群落发展的可能性和确定性模型

Ward S A, Thornton I W B：孤立群落发展的可能性和确定性．Global Ecology and Biogeography, 2000, 9

（1）种群大小为 N；瞬时出生率和死亡率分别为 λ 和 μ；种群随机漂流直到最终灭绝的概率为：

$$P_0 = \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^N$$

（2）考虑一个到达竞争者已达到其承载力(K_1)的小岛的繁殖体的命运：

$$P_{establish} = 1 - \frac{\mu}{\mu + (\lambda - \mu)(1 - \alpha_{21}K_1/K_2)}$$

式中，$P_{establish}$ 是估计概率；K_2 是物种的承载力；α_{21} 表示竞争的强度。

栎林生态系统磷素动态模型

陈金林，姜志林，张式兆等：苏南丘陵次生栎林生态系统磷素循环的系统分析与预测．生态学杂志，2000，19(1)

$$\frac{dX_i}{dt} = \left(U_{0,i} + \sum_{\substack{j=1\\i\neq j}}^{4} a_{j,i}X_j\right) - \left(T_{i,0} + \sum_{\substack{j=1\\i\neq j}}^{4} a_{j,i}X_i\right)$$

式中，$U_{0,i}$ 和 $T_{i,0}$ 均为常数；X_i 为 i 室的磷量；$a_{i,j}$ 为

周转率，表示物质从 i 分室流向 j 分室的流通量。

群落系数及其差异测量的欧几里得距离

Moreira A G：巴西中部消防措施对热带草原结构的影响．Journal of Biogeography, 2000, 27

(1) 两个群落的群落系数(C_C)：

$$C_C = s_c/(s_1 + s_2)$$

式中，s_1 和 s_2 分别是群落 1 和 2 中的物种数量；s_c 是两个群落中公共物种的数量。

(2) 差异测量的欧几里得距离(E_D)：

$$E_D = \left[\sum (A_{i1} - A_{i2})^2\right]^{0.5}$$

式中，A_{i1} 和 A_{i2} 是在群落 1 和 2 中的物种 i 的丰富度。

农业生态系统的年度总熵变化方程

Steinborn W, Svirezhev Y：熵-农业生态系统可持续性的一个指示器——以德国北部为例．Ecological Modelling, 2000, 133

$$ds = \sigma = \frac{1}{T}[W(1-\eta+\frac{\eta}{s}) - P_0] =$$

$$\frac{1}{T}[y(\frac{1}{\eta}+\frac{1}{s}-1) - P_0]$$

式中，W 是农业生态系统中人工能量的年流入量；y 为生态系统的年产出；η 为人工输入能量的产出系数，即 $y=\eta W$；P_0 为演替的闭合生态系统的总初级生产力；T 为生态系统的平均温度；s 为系统参数。

从上式可得农业生态系统可持续的限制条件：

(1) 能量负荷限度(limit energy load)：

$$W_{cr} = \frac{P_0}{1-\eta+(\eta/s)}$$

式中，W_{cr} 为可持续发展条件下人工输入能量的最大值。

(2) 最大产出限度(maximum crop production)：

$$y_{cr} = \frac{P_0}{(1/s)+(1/\eta)-1}$$

式中，y_{cr} 为可持续发展条件下最大粮食产量。

分层嵌套生态系统的热力学方程

Nielsen S N：分层嵌套生态系统的热力学．Ecological Modelling, 2000, 135

(1) 在一个生态网络中，某一个成分的能量平衡方程为：

$$\frac{dEx_i}{dt} = Ex_{impi} + \sum_m Ex_{i,m} - \sum_n Ex_{n,j} - Ex_{dissj}$$

式中，Ex_i 为生态网络中某种成分的生物能；Ex_{impi} 为外界输入能量；$Ex_{i,m}$ 为从其他成分向 i 成分流入的能量流率；$Ex_{n,j}$ 为从 j 成分向其他成分流出的能量流率；Ex_{dissj} 为 j 成分能量耗散率。

(2) 能量的最小耗散率由下式决定：

$$Ex_{diss_{min}} = \min \sum_i \frac{Ex_{diss_i}}{Ex_i}$$

能量收支方程

孙刚，盛连喜，冯江等：长春南湖生态系统能量收支的研究．生态学杂志，2000，19(2)

$$Q_{SR} - R - E - T - A - B - P - I = 0$$

式中，Q_{SR} 为湖体接受的总辐射能；R 为湖面反射的辐射能；E 为水体蒸发耗能；T 为水体增温耗能；A 为水体与大气之间热量交换过程中的能量损失；B 为水体与湖底间热量交换过程中的能量损失；P 为水生植物光合作用耗能；I 为融冰耗能。

棉田生态系统的稳定性和多样性

兰锡武，汪世泽，熊明华：自控与受控棉田生态系统稳定性的比较．生态学杂志，2000，19(2)

(1) Odum 总稳定性指标：

总稳定性 G_S 模型：

$$G_S = TS$$

式中，T 为抗干扰能力；S 为恢复力。

(2) 多样性分析方法——Shannon-Wiener 指数模型：

$$H = -\sum \frac{n_i}{N} \ln \frac{n_i}{N}$$

式中，H 为多样性值；n_i 为对每一个物种的重要值；N 为总的重要值。

生态系统服务功能评价模型

Guo Z, Xiao X, Li D：生态系统服务功能的评价：径流调节和水电能量产出．Ecological Applications, 2000, 10(3)

(1) 陆地生态系统径流调节模型：

1) 陆地生态系统一年内的径流调节能力 W_{yr} 可用下式表示：

$$W_{yr} = \mu(W_{rain} + W_{dry})$$

式中，W_{rain} 和 W_{dry} 分别代表雨季和旱季陆地生态系统的径流调节能力；μ 是一个与雨季降雨强度有关的降雨等价值

$$W_{rain} = C + L + G$$

$$W_{dry} = R$$

式中，C 是一棵树所覆盖的单位面积截留的雨水量；L 是指落叶层所包含的水量；G 是地下水的保持量；R 是地下水的排出速率。

2）流域中每种类型的复合体对径流的调节能力由下式决定：

$$W_{yr}(p_i) = \varepsilon_i \delta_j \eta_k \mu (W_{rain} + W_{dry})$$

式中，$W_{yr}(p_i)$ 是第 i 类复合体一年内对径流的调节量，ε_i、δ_j 和 η_k 是每类复合体的系数。

3）所有复合体的多年平均径流调节量 A_{WP} 可由下式得到：

$$A_{WP} = \sum_{i=1}^{90} W_{yr}(p_i) A_i$$

式中，A_i 是第 i 类复合体的面积。

(2) 水电产出与市场价值模型：

1）长江的径流量与葛洲坝水电站产生的电力的关系可用下式来描述：

$$dH/dQ = \begin{cases} -4.7\times10^{-6}Q^2 + 0.2398Q & (Q \leqslant 18\,000) \\ -0.039Q - 3498.33 & (Q > 18\,000) \end{cases}$$

式中，H 是葛洲坝水电站产生的电力；Q 是长江的径流量。

2）流域陆地生态系统调节径流产生的经济价值可用下式计算：

$$Va = HP$$

式中，Va 是葛洲坝水电站产生的电力的价值；P 是单位电价。

(3) 经济补偿模型：

该地块的土地所有者获得的经济补偿 CP_i 可用下式估算得到：

$$CP_i = (V_j + So_k + Sl_l) A_i B$$

式中，V_j、So_k 和 Sl_l 分别表示单位面积上由第 j 类植被、第 k 类土壤、第 l 类的坡面所调节的径流量；A_i 为该地块面积；B 是土地所有者从单位径流量产生的电力中所获得的收益。

种-多度分布模型

石培礼，李文华，王金锡等：四川卧龙亚高山林线生态交错带群落的种-多度关系．生态学报，2000，20(3)

(1) 几何级数分布模型：

$$n_i = NC_k k(1-k)^{i-1}$$

$$C_k = [1-(1-k)^S]^{-1}$$

式中，n_i 为第 i 种的多度；N 为总多度；C_k 为一个常数；S 为观测到的总种数；k 为在可获得的资源或空间中每个物种所占的比例。

(2) 对数级数分布模型：

$$E_n = \frac{\alpha X^n}{n} \quad (n = 1, 2, \cdots)$$

式中，E_n 为具有 n 个个体的物种期望；X 和 α 为参数，其计算公式为：$\frac{S}{N} = [-\ln(1-X)]\frac{1-X}{X}$，$\alpha = \frac{N(1-X)}{X}$

(3) 断棍分布模型：

$$S(n) = \frac{S(S-1)}{N}\left(1 - \frac{n}{N}\right)^{S-2}$$

式中，$S(n)$ 为多度级中具有 n 个个体的数量。

(4) 截型对数正态分布模型：

$$S(R) = S_0 \exp(-a^2 R^2)$$

$$a = (2\sigma^2)^{1/2}$$

式中，$S(R)$ 为第 R 个倍频程物种的数量；S_0 为模拟模型中的总物种数的估计值；σ 为标准差。

群落的生物量和光能利用效率模型

赵伟民，张现平，丁明懋等：鼎湖山格木群落的生物量和光能利用效率．生态学报，2000，20(3)

(1) 生物量的测定模型：

$$W = a(D^2 H)^b$$

$$B = \sum_{i=1}^{n} \frac{b_i}{S}$$

$$I_{la} = \sum_{i=1}^{n} \frac{A_i}{S}$$

式中，W 为植物相应部分生物量干重；D 为胸高直径；H 为树高；B 为生物量；S 为样地面积；I_{la} 为叶面积

指数；A_i 为每层每株叶面积。

（2）群落植物光合速率和呼吸速率的测定模型：

$$I = I_0 \cdot e^{-K \cdot I_{la}}$$

$$F_n = \frac{\Delta C \cdot V}{A \cdot 10^3} \frac{44}{22.4} \frac{273}{273+T} \frac{P}{101322}$$

$$R = \frac{\Delta C \cdot V}{gW_d \cdot 10^3} \frac{44}{22.4} \frac{273}{273+T} \frac{P}{101322}$$

式中，I_0 为林冠入射的 *PAR* 通量；I 为距离林冠之下各层入射的 *PAR* 通量；K 为群落或各层植物的消光系数；F_n 为净光合速率；ΔC 为叶室或呼吸装置内外气体 CO_2 的含量之差；V 为叶室或呼吸装置内气体流量；A 为叶面积；R 为呼吸速率；gW_d 为呼吸器官的干重；T 为叶室或呼吸装置内的温度；P 为大气压。

（3）群落植物生产力和光能利用效率的计算模型：

$$P_g = 9.4F_n I_{la} t$$

$$R_g' = 9.4RI_{la} t$$

$$R_g = 9.4RWt$$

$$P_n = P_g - R_g' - R_g$$

$$\varepsilon F = \frac{\text{各层植物固定的能量} \times 100}{\text{各层植物吸收PAR能量}}$$

$$\varepsilon P = \frac{P_g}{I_{abs}} \times 100$$

式中，P_g 为总生产力；P_n 为净生产力；R_g' 为叶片的夜呼吸量；R_g 为其他各部分器官的呼吸量；t 为光合或呼吸作用的时间；W 为呼吸器官干重；I_{abs} 为单位土地面积吸收的 *PAR* 能量；εF 为各层植物对吸收 *PAR* 能量的利用率；εP 为群落对 *PAR* 能量的吸收利用效率

鸟类群落指数(BCI)

O'Connell T J, Jackson L E, Brooks R P：作为阿巴拉契亚山脉中部生态条件指标的鸟类共位群. Ecological Applications, 2000, 10(6)

在阿巴拉契亚山脉中部，鸟类群落指数得分(因变量)的最佳子集多次回归模型：

BCI 得分 = 30.200 − 20.400× 森林覆盖率 −

10.100× 景观多样性 + 0.326× 森林平均高度 −

12.900× 平均坡度

Lloyd 拥挤性指数(L)

Falster D S, Murray B R, Lepschi B J：综合丰富度、占有率和空间结构——在澳大利亚东部一个开放森林的木本植物群落的不确定性模型的经验检验. Journal of Biogeography, 2001, 28

$$L = 1 + (V/\mu^2 - 1/\mu)$$

式中，V 是每个样方中个体的平均数的变化（对整个种群计算）；μ 是每个样方中个体的平均数。

关联指数

金则新：浙江仙居坑森林群落特征研究. 生态学杂志, 2001, 20(1)

$$VR = \frac{S_T^2}{\sigma_T^2}$$

式中，VR 为全部物种的关联指数；σ_T 为总体样本方差；S_T 为总种数方差。

蒸散力 E_0 的计算

闫俊华，周国逸，陈忠毅：鼎湖山人工松林生态系统蒸散力及计算方法的比较. 生态学杂志, 2001, 21(1)

（1）空气饱和差法模型：

$$E_0 = 0.0018(t+25)^2(100-f)$$

式中，t 为月平均温度；f 为月平均相对湿度。

（2）气温积温法模型：

$$E_0 = C\sum T$$

式中，C 为订正系数；$\sum T$ 为每月高于 10℃ 的积温。

(3) Penman 公式法模型：

$$E_0 = \frac{R_0\Delta + ve_a}{v+\Delta}$$

式中，R_0 为有效辐射量；Δ 为在平均湿度温度 t 时的饱和水汽压曲线的斜率；v 为干湿温度表温度常数；e_a 是 Penman 称为空气干燥力的参数。

（4）布德科公式法模型：

$$E_0 = 0.126(e_s - e_d)$$

式中，e_s 为林地 2m 高处在当时温度下的饱和水汽压；e_d 为林地 2m 高处实际饱和水汽压。

马陆的生态效益及年分解量模型

张雪萍，李春艳，张思冲：马陆在森林生态系统物质转化中的功能研究. 生态学报, 2001, 21(1)

(1) 马陆的生态效率模型：

$$C = Pr + Lf + R + Fu$$

式中，C 为摄食量；Pr 为净次级生产量；Lf 为脱落物量；Fu 为粪尿量；R 为呼吸量。

(2) 马陆的年分解量 W_n 模型：

$$W_n = \sum DBId$$

式中，D 为每月各旬马陆个体密度；B 为马陆平均生物量；I 为每月各旬马陆摄食量；d 为旬天数。

蒸腾强度模型

安树青，张久海：海岸带林草复合系统环境及其效应研究．植物生态学报，2001，25(1)

$$\text{蒸腾强度} = \frac{a_2 - a_1}{L(t_2 - t_1)}$$

式中，a_2，a_1 分别为 t_2 和 t_1 时刻容器中的水汽；L 为蒸腾仪叶夹面积。

中肋骨条藻对磷吸收的计算方程

李瑞香，朱明远，陈尚等：围隔生态系内浮游植物对富磷的影响．生态学报，2001，21(4)

$$V = V_m \frac{S}{Ks + S}$$

式中，V 为吸收速度；V_m 为最大吸收速度；S 为水体的营养盐浓度；Ks 为 $\frac{1}{2}V_m$ 时营养盐的浓度。

"4P"概念、估算及其相互关系模型

方精云，柯金虎，唐志尧等：生物生产力的"4P"概念、估算及其相互关系．植物生态学报，2001，25(4)

(1) 总初级生产力 P_{gp} 模型：

$$P_{gp} = C_{max} f(R_{pa}) f(F_{lea}) \times f(T) f(CO_2, H_2O) f(A_n)$$

式中，C_{max} 为最大碳同化率；R_{pa} 为光合有效辐射；F_{lea} 为相对叶面积；T 为温度；CO_2 为大气 CO_2 浓度；H_2O 为水分有效性；A_n 为 N 的有效性。

(2) 净初级生产力 P_{np} 模型：

$$P_{np} = P_{gp} - R_a$$

式中，R_a 为自养生物本身呼吸所消耗的同化产物。

(3) 净生态系统生产力模型：

$$P_{ne} = P_{np} - R_h$$

式中，P_{ne} 表示大气 CO_2 进入生态系统的净光合产量；R_h 为异养呼吸消耗量(土壤呼吸)。

(4) 净生物群区生产力 P_{nb} 模型：

$$P_{nb} = P_{ne} - R_n$$

式中，R_n 为非呼吸代谢所消耗的光合产物。

群落结构及其在落叶分解过程中变化的模型

柯欣，赵立军，尹文英：青冈林土壤线虫群落结构在落叶分解过程中的变化．生态学报，2001，21(6)

(1) 群落结构模型：

$$H' = \sum_{i=1}^{S} P_i \log_2 P_i$$

$$J = \frac{H'}{\log_2 S}$$

式中，H' 为 Shannon 多样性指数；J 为类群的丰富度和均匀度；S 为类群数；P_i 为第 i 类群的百分比。

(2) 演体指数 M 及偏差 S_d 模型：

$$M = \frac{\sum_{i=1}^{S} t_i n_i}{N}$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{S} n_i (t_i - M)^2}{N}}$$

式中，S 为类群数；t_i 为开始到第 i 次采样时的月数；n_i 为第 i 次采样时某类群的个体数；N 为某类群个体总数。

(3) 落叶质量损失 Q 模型：

$$Q = \left(1 - \frac{\text{落叶残存量(干重)}}{\text{落叶分解前埋入量(干重)}}\right) \times 100\%$$

矮蒿草草甸植物群落生长分析的模拟模型

师生波，贲桂英，韩发等：青藏高原地区矮蒿草草甸植物群落生长分析．生态学报 2001，21(6)

(1) 拟合方程：

$$\ln Y = y(T) = a' + b'T + c'T^2 + d'T^3$$

$$\ln Z = z(T) = a + bT + cT^2 + dT^3$$

式中，Y 为植物地上生物量；Z 为绿色部分的投影面

积；T 为从生长季开始的天数。

(2) 叶面积速率 U_{LR} 模型：

$$U_{LR}=\frac{1}{Z}\frac{dY}{dT}=\frac{y'(T)}{\exp[z(T)-y_d(T)]}$$

式中，$\exp[z(T)-y_d(T)]$ 为单位干重叶片表现出的同化功能面积。

(3) 植物群落的生长速率 C_{GR} 模型：

$$C_{GR}=\frac{1}{S}\frac{dY}{dT}=U_{LR}L_{AI}$$

式中，S 为土地面积，即样方面积；L_{AI} 为群落叶面积系数。

各采样点潜水的主要理化指标

王为东，王大力，尹澄清等：芦苇型湿地生态系统的潜水水质状态研究. 生态学报，2001，21(6)

(1) 水体中游离 CO_2 浓度 C_{CO_2} 模型：

$$C_{CO_2}=A_C\frac{a_{H^+}^2}{a_{H^+}K_1'+2K_1'K_2'}$$

式中，A_C 为碳酸盐碱度；a_{H^+} 为氢离子活度；K_1' 和 K_2' 分别为碳酸的 1 级、2 级表观电离常数。

(2) 水体中 CO_2 的分压 P_{CO_2}' 模型：

$$P_{CO_2}'=\frac{C_{CO_2}}{\alpha}$$

式中，α 为 CO_2 的溶解度系数。

^{60}Co 在水-土壤-水稻中的迁移模型

孙志明，陈传群，王寿祥等：放射性钴在模拟水稻田中的迁移模型. 生态学报，2001，21(6)

$$\frac{dq_1}{dt}=-(k_{12}+k_{13})q_1+k_{21}q_2$$

$$\frac{dq_2}{dt}=k_{12}q_1-(k_{21}+k_{23})q_2$$

$$\frac{dq_3}{dt}=k_{13}q_1+k_{23}q_2$$

式中，$\frac{dq_i}{dt}$ 为各分室中 ^{60}Co 量对时间的变化率；k_{ij} 为 ^{60}Co 由第 i 分室向第 j 分室转移的速率，可视为数。

鲻鱼寄生蠕虫群落中的种间关系

吴金英，吕军仪，曾华等：鲻鱼寄生蠕虫群落生态研究. 生态学报，2001，21(6)

$$V=\frac{ad-bc}{\sqrt{(a+b)(c+d)(a+c)(b+d)}}$$

式中，$V>0$ 为正协调关系；$V<0$ 为负协调关系；$V=0$ 为种间无协调关系。

群落结构分析模型

焦懿，赵莘：不同产第白蜡虫产卵期天敌的种类及其群落结构研究. 生态学报，2001，21(7)

(1) 白蜡虫天敌群落结构参数模型：

$$C=\sum P_i^2$$

$$J=1-\frac{\sum[n_i(n_i-1)]}{N(N-1)}$$

$$H'=-\sum P_i\log_2 P_i$$

$$H=N^{-1}\log_2\frac{N!}{n_1!n_2!n_3!\cdots}$$

$$D_{Mc}=\frac{N-(\sum n_i)^{1/2}}{N-N^{1/2}}$$

$$E=\frac{H'}{\log_2 S}$$

式中，C 为群落优势度集中指数；J、H、H'、D_{Mc} 均为多样性指数；E 为均匀性指数；n_i 为第 i 个物种的个数；N 为群落种所有物种的个体数总和；P_i 为群落中 i 物种的百分率；S 为物种数。

(2) 群落相似性分析模型：

$$PS=\sum\min P_i$$

$$D=100-PS$$

式中，PS 为百分率相似性系数；D 为百分率相异性系数；P_i 为群落中 i 物种的百分率。

生态模拟和扰动评估模型

DeAngelis D L, Waterhouse J C, Post W M et al：生态模拟和扰动评估. Ecological Modelling, 29

(1) 多单元平衡模型：

考虑大量的单元，每一个单元自身处于不平衡之中。在两个物种的竞争系统之中，P_0 表示被相邻物种占据的单元；P_1 是被物种 1 独自占据的单元；P_2 是被物种 2 独自占据的单元；P_3 是被物种 1 和 2 同时占据的单元。

$$\frac{dP_0}{dt}=-(m_1Y_1+m_2Y_2)P_0+e_1P_1+e_1P_2+e_1P_3$$

$$\frac{dP_1}{dt}=m_1Y_1P_0-e_1P_2+(m_2-\mu_2)Y_2P_1$$

式中，e_1 是扰动速率；损失速率 $m_1Y_1+m_2Y_2$，$Y_1=P_1+P_3$ 并且 $Y_2=P_2+P_3$，表示物种 1 和 2 对于空单元的再度迁移（m_1、m_2 是常数）；$(m_2-\mu_2)Y_2$ 是物种 2 的替代速率。

(2) 多单元非平衡模型：

地块收缩的子模型为：

$$\frac{d\xi}{dt}=g(t,a,\xi)$$

式中，ξ 为地块大小；a 为地块年龄；t 是时间；$g(t,a,\xi)$ 是依赖于地块内幼虫的侵入速率和生物体从地块周围向内生长速率的函数。

地块中的总个体数，用 $n(a,\xi,t)$ 来表示，它是在时间 t 的年龄——大小密度函数。动力学方程为：

$$\frac{\partial n}{\partial t}-\frac{\partial n}{\partial a}+\frac{\partial}{\partial \xi}(gn)=-\mu(a,\xi,t)n$$

式中，$\mu(a,\xi,t)$ 是由于 Mytilus 的瞬时繁殖导致的地块的衰退速率。

决定墨西哥洛斯德克斯拉斯地区森林、草地及玉米地的地上生物量组成的方程式

Hughes R F, Kauffman J B, Jaramillo V：生态系统尺度对墨西哥热带潮湿区森林采伐与土地利用的影响。

树≥10cm 胸径：

$$Q_{biomass}=\{\exp[-2.409+0.9522\ln(D^2HSg)]\}CF\times10^{-3}$$

色克洛比亚(Cecropia)≥10cm 胸径（树木）：

$$Q_{biomass}=[\exp(-3.78+0.95\ln D^2+1.00\ln H)]\times10^{-3}$$

色克洛比亚(Cecropia)≥10cm 胸径（叶）：

$$Q_{biomass}=(-0.56+0.02D^2+0.04H)\times10^{-3}$$

直立的死树≥10cm 胸径：

$$Q_{biomass}=\pi[(D/2)^2]H(0.42)$$

树<10cm 胸径：

$$Q_{biomass}=[\exp(4.9375+1.0583\ln D^2)]CF\times10^{-6}$$

死树 <10cm 胸径：

$$Q_{biomass}=[\exp(4.6014+1.1204\ln D^2)]CF\times10^{-6}$$

棕榈：

$$Q_{biomass}=\{\exp[3.6272+0.5768\ln(D^2H)]\}CF\times10^{-6}$$

死棕榈：

$$Q_{biomass}=\{\exp[-0.5285+0.9907\ln(D^2H)]\}CF\times10^{-6}$$

树叶：

$$Q_{biomass}=\{\exp[-1.897+0.836\ln(D^2H)]\}\times10^{-3}$$

式中，D 是指胸径；H 是高度；Sg 是树木的比重；CF 是修正系数，$Q_{biomass}$ 为相应森林、草地及玉米的地上生物量。

第二十二章 行为生态学与进化生态学

经典的 Rosenzweig-MacArtur 模型

Rinaldi S, Muratori S：季节性紊乱的捕食者-被捕食者模型中的条件混沌. Ecological Modelling, 1969, 1

$$\dot{x} = x\left[r\left(1-\frac{x}{K}\right)-\frac{ay}{b+x}\right]$$

$$\dot{y} = y\left(e\frac{ax}{b+x}-d\right)$$

式中，x 和 y 是捕食者和被捕食者种群中的个体数量；六个参数 r, K, a, b, d 和 e 都是正数；r 是固有的生长率；K 是被捕食者的承载力；函数 $q(x)=ax/(b+x)$是类型 II 的功能反应，a 是每个捕食者的最大收获率，b 是半饱和常数，即捕食率是最大值的一半时的被捕食者密度；e 是简化的转换因子，又被称为转换效率；d 是每个捕食者的死亡率。

模型平衡的局部稳定性分析显示下面的等式中有一个 Hopf 分裂：

$$K = b\frac{ea+d}{ea-d}$$

并且下面的等式中有一个 transcritical 分裂：

$$K = b\frac{d}{ea-d}$$

带有时间延迟的捕食者-被捕食者相互作用模型

Murdoch W W：多样性、复杂性、稳定性和害虫控制. Journal of Applied Ecology, 1975, 12

$$\frac{dH}{dt} = aH(t-\Delta t) - bP(t-\Delta t)H(t-\Delta t)$$

$$\frac{dP}{dt} = cP(t-\Delta t) - dP(t-\Delta t)H(t-\Delta t)$$

式中，H 是被捕食者的数量；P 是捕食者的数量；a 和 c 分别是被捕食者出生率和捕食者死亡率；b 是捕食者攻击率；d 是被捕食者转化成捕食者的效率；Δt 是时间延迟。这个系统是不稳定的。但把这个系统分成两部分就稳定了，分别用下标 1 和 2 表示，并且加上表示个体从一个子系统到另一个子系统的随机运动的项：

$$\frac{dH_1}{dt} = a_1H_1(t-\Delta t) - b_1P_1(t-\Delta t)H_1(t-\Delta t) + \alpha H_2(t-\Delta t)$$

$$\frac{dP_1}{dt} = c_1P_1(t-\Delta t) - d_1P_1(t-\Delta t)H_1(t-\Delta t) + \beta P_2(t-\Delta t)$$

$$\frac{dH_2}{dt} = a_2H_2(t-\Delta t) - b_2P_2(t-\Delta t)H_2(t-\Delta t) + \gamma H_1(t-\Delta t)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = c_2P_2(t-\Delta t) - d_2P_2(t-\Delta t)H_2(t-\Delta t) + \delta P_1(t-\Delta t)$$

式中，α，β，γ 和 δ 是系数。

昆虫分布数量的时空模型

Freeman G H：关于昆虫分布数量的时空模型. Journal of Applied Ecology, 1977, 14

$$\lg Y = a - b\sqrt{x} - ht + cx\lg t$$

式中，Y 是距参考点距离为 x 处的昆虫数量；t 是时间；a、b、c 和 h 是参数。

森林中降水中途截留的预测模型

Rutter A J, Morton A J：森林中降水中途截留的预测模型 III.－模型对林分参数和气象变量的灵敏度. Journal of Applied Ecology, 1977, 14

(1) 当树冠上的水深(C)等于或超过它的储存能力(S)的时候，蒸发以一定潜在速率(E_p)进行。当 $C < S$ 时，蒸发速率 E 如下：

$$E = E_pC / S$$

(2) 树冠的排泄率（D）为：

$$D = D'\exp(bC)$$

式中，D' 和 b 是常数。

种群动态模型

Logofet D O, Svirezhev Y M：作为全球生物圈模型一部分的人口动力学模型——对话制度下建模的某些方面。Ecological Modelling, 1980, 9

组密度动力学 $P_i(t)$，$i=1,2,3,4$，由每年的自然成长率、死亡率和存活率之间的平衡来决定，它可以由下面的方程来描述：

$$P_1(t+1)=\sum_{j=1}^{4}d_{1j}P(t)$$

$$P_i(t+1)=d_{i,i-1}P(t)+d_{ii}P_i(t)$$

式中，t 表示以年为单位的时间；d_{1j} 是第 j 组的每年出生率；假设主要的繁殖潜力集中在第二组，并且第四组不产生后代，且有下面的关系：$d_{13}=0$，$d_{14}=0$；系数 $d_{i,i-1}$ 反映了第 $i-1$ 组自然成长的过程，它依赖于年龄组内的年龄分布；系数 d_{ii} 包括特定年龄死亡率 m_i 的值，并且由自然平衡关系决定，可表达为 $d_{ii}+\sum_{j\neq i}d_{ij}=1-m_i$，$i=1,2,3,4$。

生态位交叠系数

Schwartz C C, Ellis J E：低草草原上某些本地和家养的有蹄类动物中的取食生态学和取食生态位。Journal of Applied Ecology, 1981, 18

$$C_\lambda=\frac{2\sum_{i=1}^{S}X_iY_i}{\sum_{i=1}^{S}X_i^2+\sum_{i=1}^{S}Y_i^2}$$

式中，C_λ 是交叠系数，测量食草动物 X 和 Y 之间的食物交叠度；S 是植物群丛的总数；X_i 和 Y_i 是食草动物 X 和 Y 从植物群丛 i 中取食总量的比率。

岩石山地白杨生境中的草料生产模型

Roise J P, Betters D R, Kent B M：一种职能化关键环境因子的方法——岩石山地白杨生境中的草料生产。Ecological Modelling, 1981, 14

（1）有效能量的假设方程 X_2：

$$X_2=b_{10}\cos\left[\arccos\left(\frac{b_{11}-Z_1}{b_{12}}\right)-Z_2\right]$$

（2）生产模型：

$$Y=A\exp(b_0-b_3Z_3+b_7Z_7+b_8Z_8+b_9Z_9-b_{10}X_2)$$

式中，Z_1 是以 m 为单位的高度；Z_2 是以 rad 为单位的方位；Z_3 是每 hm^2 的植物茎干数量；Z_7 是 A 层的颜色；Z_8 是 B 层的颜色；Z_9 是以 g 为单位的土地容量；A 和 b_i 是系数。

粘虫迁飞的运动方程

赵圣菊，丁林根：底层大气垂直运动对粘虫起飞、降落的影响。生态学报，1981，1(2)

$$W=\sqrt{|C+B+V\Delta\rho|f}$$

式中，W 为粘虫的上升速度；C 为粘虫的飞翔力；B 为粘虫获得的抬升或下沉的附加力；f 和 $V\Delta\rho$ 近似为常数。

昆虫种群死亡过程的数字模拟模型

陈维博，陈玉平：昆虫种群死亡过程的数字模拟。生态学报，1981，1(2)

（1）种群生长发育的“闷罐车”模型：

$$\begin{cases}C_{t+\Delta t}[1]=C_t[I]+F\{C_t[I-1]-C_t[I]\}, \\ \qquad (I=2,3,\cdots,N) \\ C_{t+\Delta t}[1]=C_t[1]\cdot(1-F), \\ C[1]\big|_{t=0}=C_0,\ C[I]\big|_{t=0}=0, \\ \qquad (I=2,3,\cdots,N)\end{cases}$$

式中，$\Delta t=F\dfrac{t_{av}}{N}$；$F=1-N\left(\dfrac{\sigma_t}{t_{av}}\right)^2$。

（2）死亡率 r_d 模型：

$$r_d=\frac{1}{1+\dfrac{1}{F\left(\dfrac{1}{\sqrt[N]{1-R}}-1\right)}}$$

式中，F 同上，R 为已知种群在某特定的发育历期中的总死亡率；N 为“闷罐车”模型的发育等级数。

粘虫的迁飞发生区及其分布的数学模型

郁祥光：粘虫的迁飞发生区及其分布的数学模型。生态学报，1981，1(4)

（1）水平分布的数学模型：

迁飞后的最终降落点模型：

$$h\theta=90°-\psi+\delta\theta$$

式中，$h\theta$ 为太阳高度角；$\delta\theta$ 为当天太阳赤纬；ψ 为地方纬度

(2) 垂直分布的数学模型：

粘虫在我国的水平分布与垂直分布关系的方程式：

$$h - h' = (62.9 + 0.7\psi'')(\psi - \psi')$$

式中，h 为粘虫成虫迁出区垂直高度；h' 为迁入区垂直高度；ψ 为水平迁出区水平位置；ψ' 为迁入区水平位置；ψ'' 为垂直迁飞区迁出区的地方纬度。

被捕食者-捕食者联合体的收获量模型

Beddington J R, Cooke J G：被捕食者-捕食者联合体的收获量。Ecological Modelling, 1982, 14

(1) 被收获的两个营养级的模型：

$$\dot{X}_1 = r_1 X_1(1 - X_1 - vX_2) - H_1$$

$$\dot{X}_2 = r_2 X_2(1 - X_2 / X_1) - H_2$$

式中，X_1 是相对被捕食者种群；X_2 是相对捕食者种群；r_1 是被捕食者的内在生长率；r_2 是捕食者的内在生长率；H_1 和 H_2 是任何的收获制度；v 是捕食的内在系数。

(2) 当仅仅收获被捕食者时的方程：

$$\dot{X}_1 = r_1[X_1(1 - X_1 - vX_2) - Y_1]$$

$$\dot{X}_2 = r_2 X_2(1 - X_2 / X_1)$$

式中，Y_1 是由因子 r_1 衡量的被捕食者的产量，假定它是常数。

(3) 存在稳定平衡时的最大被捕食者产量：

$$Y_1(\text{max,stable}) =$$

$$\{1 - [(1 - r_2 / r_1)2(1 + v)/(2 + v) - 1]^2\} / 4(1 + v)$$

(4) 当捕食者和被捕食者都被收获时的方程：

$$\dot{X}_1 = r_1(X_1(1 - X_1 - vX_2) - Y_1)$$

$$\dot{X}_2 = r_2 X_2(1 - F_2 - X_2 / X_1)$$

式中，F_2 是捕食者的捕食效率。

(5) 存在稳定平衡时 Y_1 的最大值为：

$$Y_1(\text{max,stable}) =$$

$$\{1 - [1 - (1 - F_2)r_2 / r_1][2f/(1 + f) - 1]^2\} 4f$$

式中，$f = 1 + v(1 - F_2)$。

Volterra 方程的极限环解

易希璋，刘嘉欣：具有食饵自身抑制作用的 Volterra 方程的极限环解．生态学报，1982，2(1)

(1) Volterra 模型：

$$\frac{dx}{dt} = ax - bx^2 - cxy$$

$$\frac{dy}{dt} = -ey + c'xy$$

式中，x 和 y 分别为食饵密度与捕食者密度；a 为食饵内禀增长率；e 为捕食者死亡率；c'，c 分别为捕食者与食饵的相互作用项系数；$-bx^2$ 为食饵的"自抑制"项。

(2) 极限环分支解的近似表示式：

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} + \frac{1}{\sqrt{1+\gamma_1}} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}}(1-i) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(1-i) \end{pmatrix} e^{i\sqrt{ea}t} + \frac{1}{\sqrt{1+\gamma_1}} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}}(1+i) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(1+i) \end{pmatrix} e^{-i\sqrt{ea}t} \equiv \begin{pmatrix} x^{(+)} \\ y^{(+)} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} + \frac{1}{\sqrt{1+\gamma_{-1}}} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}}(1-i) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(1-i) \end{pmatrix} e^{-i\sqrt{ea}t} + \frac{1}{\sqrt{1+\gamma_{-1}}} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}}(1+i) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(1+i) \end{pmatrix} e^{i\sqrt{ea}t} \equiv \begin{pmatrix} x^{(-)} \\ y^{(-)} \end{pmatrix}$$

式中，$\gamma_1 = \dfrac{(ac' - be)^2}{c^2 ea}$；$\gamma_{-1} = \dfrac{ac'^2 + b^2 e}{c^2 e}$。

捕食 Ⅱ 模型

李超，丁岩钦，马世骏：草间小黑蛛对棉铃虫幼虫的捕食作用及其模拟模型的研究(Ⅱ.捕食者—多种猎物系统的研究)．生态学报，1982，2(3)

$$\begin{cases} N_{1,t+1} = N_{1,t}\left[1+r_1\left(1-\frac{N_{1,t}}{K_1}\right)\right]\times \\ \qquad \exp\left[-\frac{dQ_1P_t^{1-m}\sum_{ai}F_i\sum N_{i\cdot t}}{N_{1,t}\left(1+\sum_{ai}F_i\sum T_{hi}F_i\sum N_{it}\right)}\right] \\ N_{2,t-1} = N_{2,t}\left[1+r_2\left(1-\frac{N_{2,t}}{K_2}\right)\right]\times \\ \qquad \exp\left[-\frac{dQ_2P_t^{1-m}\sum_{ai}F_i\sum N_{i\cdot t}}{N_{2,t}\left(1+\sum_{ai}F_i\sum T_{hi}F_i\sum N_{it}\right)}\right] \\ P_{t+1} = \frac{dQ_1BP_t^{1-m}\sum_{ai}F_i\sum N_{i\cdot t}}{1+\sum_{ai}F_i\sum T_{hi}F_i\sum N_{it}} + XP_t \end{cases}$$

式中，$N_{1,t}$、$N_{1,t+1}$、$N_{2,t}$、$N_{2,t+1}$，P_t和P_{t+1}分别为棉铃虫、棉蚜和草间小黑蛛在第t和t+1世代中的数量；r_1、r_2、K_1和K_2分别为棉铃虫和棉蚜的内禀增长率和环境容纳量；Q_1、Q_2分别为对每猎物物种的捕食作用占总捕食作用的比例；d和B为常数。

捕食 I 模型

李超，丁岩钦，马世骏：草间小黑蛛对棉铃虫幼虫的捕食作用及其模拟模型的研究(I.捕食者—单种猎物系统的研究)。生态学报，1982，2(3)

$$\begin{cases} N_{t+1} = N_t\left[1+r\left(1-\frac{N_t}{K}\right)\right]\exp\left(-\frac{adP_t^{1-m}}{1+aT_hN_t}\right) \\ P_{t+1} = \frac{adBN_tP_t^{1-m}}{1+aT_hN_t} + XP_t \end{cases}$$

式中，N为猎物数量；P为捕食者数量；r为猎物种群的内禀增长率；K为环境容纳量；B为转换效率；m为干扰常数；X为对其他猎物的依赖程度；d为一常数。

Lotka-Volterra 的捕食-被捕食系统模型

丁岩钦，陈玉平：系统分析及其在生态学中的应用。生态学杂志，1982，3

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = N_1(\alpha_1-\gamma_1N_2) \\ \frac{dN_2}{dt} = N_2(\alpha_2-\gamma_2N_1) \end{cases}$$

式中，α_1、α_2，γ_1和γ_2为常数；N_1和N_2为两个种的密度。

小鸟数量的结构模型

Smies M：小鸟数量的模拟－I.随机模型的发展 Ecological Modelling，1983，20

(1) 幸存者模型：

对种群中的每一个成员i，生存的可能性P_i每年要计算四次，对应于四个季节。

$$P_i = P_sA_iD_iQ_i$$

式中，P_s是标准的季节性存活率；A_i是一个依赖于年龄的存活因素；D_i是一个取决于存活状况的密度因素；Q_i是通常条件下的一个波动因素。

标准的年度存活率P_y可用下式表示：

$$P_y = 1-(25-Y_m)/Y_m^2$$

式中，$Y_m > 5.53$，Y_m是生命周期的年数。

$$A_i = (Y_m/Y_i)^{\ln Y_m}$$

式中，$Y_i > Y_m$，Y_i是个体的年龄。

对冬季的幸存者，D_i可由下式计算：

$$D_i = (W_t/N_t)^{D_f}$$

式中，$N_t > W_t$，W_t是指在t年时的过冬能力，N_t是指实际的群体大小；D_f是指该种群的一般密度依赖因素。

(2) 繁殖模型：

繁殖成功可以通过繁殖鸟的窝卵数(C_i)来调节：

$$C_i = \{1-C_r-[0.5-(\overline{B}-N_r+1)/\overline{B}]\}\times Q_iC_n\times 0.5$$

式中，C_r是密度依赖变量的窝卵数大小；N_r繁殖者的等级；C_n是一个平均值为$\overline{C}$、标准差为S_c的正态分布的一个随机数。繁殖鸟的数量受栖息地育种能力的限制，当使用一个平均值为$\overline{B}$的正态分布的随机数时，这种能力可由模型产生。当用这个模型模拟一个全为雌性的种群时，将每对的窝卵数乘以0.5即可转换为每个个体的窝卵数。

土地等价系数概念模型

Adetiloye P O, Ezedinma F O C, Okigbo B N：源于评价从简单到复杂的作物混种所引起的竞争与高产相互作用的一个土地等价系数概念 Ecological Modelling，1983，19

(1) 土地等价比率(LER)：它是一个被广泛用于比

较混种作物与单一作物的生产力的一个指数：

$$\mathrm{LER} = R_a + R_b = L_a + L_b = y_a / Y_a + y_b / Y_b$$

式中，R_a，R_b 与 L_a，L_b 分别指作物成分 A 和 B 的相对产量与土地等价比率；y_a，y_b 为间作作物 A 与 B 的产量，Y_a，Y_b 是它们的最大的单一作物产量。

(2) 土地等价系数(L_{EC})：

土地等价系数是指各间作作物的土地等价系数的乘积，可表示为：

$$L_{EC} = (y_a / Y_a) \times (y_b / Y_b)$$

帆布潜鸭的性别比率和最佳收获量模型

Alexander W C, Taylor R J：帆布潜鸭的性别比率和最佳收获量。Ecological Modelling, 1983, 19

(1) 性别比率模型：

$$N_m(t+1) = \left[N_m(t) + N_f(t)\frac{\delta C}{2}\right] F[N_m(t), N_f(t)]$$

$$N_f(t+1) = N_f(t)\delta\left(1 + \frac{C}{2}\right) G[N_m(t), N_f(t)]$$

式中，$N_m(t)$ 和 $N_f(t)$ 分别代表繁殖期开始时雄鸭和雌鸭的数量；常量 δ 代表雌鸭能活过筑巢季节的比例，并假定所有雄鸭都能活过夏季；参数 C 是指每个季节每只雌鸭所产的快要能飞的幼鸭数量；函数 F 和 G 是指在非繁殖期间种群中雄鸭和雌鸭的生存因素。

(2) 均衡状态下的性别比率：

$$\frac{N_m}{N_f} = \frac{\delta C}{\delta(2 + C)(G/F) - 2}$$

(3) 若用 h_m 和 h_f 分别表示雄鸭和雌鸭被捕杀的部分，则方程式为：

$$N_m(t+1) = \left[N_m(t) + N_f(t)\frac{\delta C}{2}\right](1 - h_m) F_h[N_m(t), N_f(t)]$$

$$N_f(t+1) = N_f(t)\delta\left(1 + \frac{C}{2}\right)(1 - h_f) G_h[N_m(t), N_f(t)]$$

$$F_h[N_m(t), N_f(t)] = 1/\{1 + \alpha[N_m(t) + N_f(t)\delta C/2](1 - h_m) + N_f(t)\delta(1 + C/2)(1 - h_f)\}$$

$$G_h[N_m(t), N_f(t)] = \frac{1}{1 + (N_m(t) + N_f(t)\delta C/2)(1 - h_m)}$$

式中，α 是参数。

资源消耗系统

Blackwell A L：资源消耗过程中的极限：罗埃尔岛驼鹿数量剧增的数学模型．第一部分，生态背景和模型发展．Ecological Modelling, 1983, 20

$$\frac{dx_1}{dt} = -a_1x_1 - a_2x_2\{\exp(-a_3x_2/x_1) + a_4x_1\exp[-x_1/(a_5x_2)]\} + a_6x_1/(a_7 + x_1)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -b_1x_1 + b_2x_2\{\exp(-a_3x_2/x_1) + a_4x_1\exp[-x_1/(a_5x_2)]\}$$

$$x_1(0) = x_{10}$$

$$x_2(0) = x_{20}$$

式中，x_1 是可用牧草量的标准产量；x_2 驼鹿数量，a_1x_1 是一个代表草食动物自然死亡率的参数；$a_2x_2\{\exp(-a_3x_2/x_1)+a_4x_1\exp[-x_1/(a_5x_2)]\}$ 是指由于昆虫与其他草食动物食用以及植被的呼吸需求而造成的可利用牧草的损失速率；$a_6x_1/(a_7+x_1)$ 表示由于太阳辐射转化为植物生物量而引起的可用牧草量的标准产量的增长速率；a_i 是一个参数；$b_2x_2\{\exp(-a_3x_2/x_1)+a_4x_1\exp[-x_1/(a_5x_2)]\}$ 代表牧草变为驼鹿生物量的同化速率；$-b_1x_1$ 代表呼吸作用的频率，包括维持、繁殖、体温调节、发育与活化新陈代谢所需。

种群增长的数学模型

李自珍：种群增长的数学模型探讨。生态学杂志，1983，2

(1) 种群增长的确定性模型：

1) 种群自然增长的数学模型：

$$\begin{cases} \dfrac{dX}{dt} = rX \\ X|_{t=0} = X_0 \quad \text{(初始状态)} \end{cases}$$

式中，r 为自然增长率。

2) 种群阻滞增长的数学模型：

$$\begin{cases} \dfrac{dX}{dt} = rX\left(1 - \dfrac{X}{k}\right) \\ X|_{t=0} = X_0 \quad \text{(初始状态)} \end{cases}$$

式中，$-\frac{r}{k}X^2$ 为抑制项。

3）考虑种群控制的阻滞增长模型：

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = rX\left(1-\frac{X}{k}\right)-h \\ X\big|_{t=0} = X_0 \quad \text{(初始状态)} \end{cases}$$

式中，h 为控制量。

(2) 种群增长的随机性模型：

人类种群的死亡过程动态模型：

$$\frac{dP_X(t)}{dt} = \lambda(X-1)P_{X-1}(t) - (\lambda+\mu)XP_X(t) + \mu(X+1)P_{X+1}(t)$$

式中，$P_X(t)$ 为 t 时刻人口数量等于 X 的概率；λ 和 μ 分别为出生率和死亡率。

捕食 III 模型

李超：草间小黑蛛对棉铃虫幼虫的捕食作用及其模拟模型的研究（Ⅲ.模拟模型的进一步研究）。生态学报，1983，3(2)

模型A：
$$\begin{cases} N_{1,t+1} = N_{1,t}\left[1+r_1\left(1-\frac{N_{1,t}}{K_1}\right)\right]\exp\left(-\frac{EQ_1}{N_{1,t}}\right) \\ N_{2,t+1} = N_{2,t}\left[1+r_2\left(1-\frac{N_{2,t}}{K_2}\right)\right]\times \exp\left[-\frac{E(1-Q_1)}{N_{2,t}}\right] \\ P_{t+1} = EBQ_1 + XP_t \end{cases}$$

模型B：
$$\begin{cases} N_{1,t+1} = N_{1,t}\left[1+r_1\left(1-\frac{N_{1,t}}{K_1}\right)\right]\exp\left(-\frac{EQ_1}{N_{1,t}}\right) \\ N_{2,t+1} = N_{2,t}\left[1+r_2\left(1-\frac{N_{2,t}}{K_2}\right)\right]\times \exp\left[-\frac{E(1-Q_1)}{N_{2,t}}\right] \\ P_{t+1} = BN_{1,t}\left[1-\exp\left(-\frac{EQ_1}{N_{1,t}}\right)\right] + XP_t \end{cases}$$

模型C：
$$\begin{cases} N_{1,t+1} = N_{1,t}\exp\left[r_1\left(1-\frac{N_{1,t}}{K_1}\right)\right]\exp\left(-\frac{EQ_1}{N_{1,t}}\right) \\ N_{2,t+1} = N_{2,t}\exp\left[r_2\left(1-\frac{N_{2,t}}{K_2}\right)\right]\times \exp\left[-\frac{E(1-Q_1)}{N_{2,t}}\right] \\ P_{t+1} = EBQ_1 + XP_t \end{cases}$$

模型D：
$$\begin{cases} N_{1,t+1} = N_{1,t}\exp\left[r_1\left(1-\frac{N_{1,t}}{K_1}\right)\right]\exp\left(-\frac{EQ_1}{N_{1,t}}\right) \\ N_{2,t+1} = N_{2,t}\exp\left[r_2\left(1-\frac{N_{2,t}}{K_2}\right)\right]\times \exp\left[-\frac{E(1-Q_1)}{N_{2,t}}\right] \\ P_{t+1} = BN_{1,t}\left[1-\exp\left(-\frac{EQ_1}{N_{1,t}}\right)\right] + XP_t \end{cases}$$

式中，$E = \frac{dP_t^{1-m}\sum F_i a_i \sum N_{i,t}}{1+\sum F_i a_i \sum F_i T_{hi} \sum N_{i,t}}$；

$Q_1 = \frac{C_1F_1}{C_1F_1+1-F_1}$；$a_i$，$T_{hi}$ 为由实验室实验的结果估计出的参数值；$N_{1,t}$，$N_{1,t+1}$，$N_{2,t}$，$N_{2,t+1}$，P_t 和 P_{t+1} 分别为棉铃虫、棉蚜和草间小黑蛛在第 t 和 $t+1$ 世代中的数量；r_1，r_2，K_1 和 K_2 分别为棉铃虫和棉蚜的内禀增长率和环境容纳量；Q_1 为捕获棉铃虫数占总捕获猎物数的比例；X 为捕食者对除棉铃虫以外的其他类物的依赖程度；d 和 B 为常数。

滞留指数 *I*

吴敦肃，符文俊：控制昆虫行为的生态活性物质的研究方法（Ⅰ）—样品收集、纯化和结构鉴定。生态学杂志，1983，4

$$I = \frac{\lg Rt - \lg Rt(n-c_z)}{\lg Rt(n-c_{z+2}) - \lg Rt(n-c_z)} + 100Z$$

式中，Rt 为滞留时间；$n-c_z$ 为碳原子数目为 z 个的直链烷；$n-c_{z+2}$ 为碳原子数目为 z+2 个的直链烷。

两个共生水稻品种之间的邻近影响模型

Sano Y, Sano R, Morishima H：两个共生水稻品种 *Oryza sativa* 和 *O. glaberrima* 之间的邻近影响。The Journal of Applied Ecology, 1984, 21

（1）相对拥挤系数(k_{ij})：

$$k_{ij}=\frac{z_j y_{ij}}{z_i y_{ji}}\Bigg/\frac{y_{ii}}{y_{ij}}$$

式中，y_{ij} 和 y_{ii} 代表混合的和纯的生境中，系族 i 的干重或者每个穴中种子的数量；z_i 和 z_j 分别代表系族 i 和 j 中种子出现的相对频率。

(2) 在 1:1 混合物中竞争的效果：

$$h_{ij}-h_{ji}=\ln\left(\frac{z_j y_{ij}}{z_i y_{ji}}\Bigg/\frac{y_{ii}}{y_{jj}}\right)=\ln k_{ij}$$

生境重叠模型

Osborne B C：西部高地的赤鹿(*Cervus elaphus* l.)和高山绵羊的栖息地利用，The Journal of Applied Ecology, 1984, 21

绵羊、母赤鹿和栖息地之间的生境重叠可以用 Pianka 指数 (1973)计算：

$$O_{jk}=\frac{\sum_{i=1}^{n}P_{ij}P_{ik}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}P_{ij}^2\sum_{i=1}^{n}P_{ik}^2}}$$

式中，O_{jk} 是在 j 和 k 之间生境重叠的量度；P_{ij} 和 P_{ik} 分别是物种 j 和 k 在资源 $i-n$ 上花费的时间部分。

两个竞争物种的生长模型

Holm J, Kellomäki S：森林地被植物中两个竞争物种的生长策略比较，Ecological Modelling, 1984, 23

(1) $\rho(h)$ 表示系统在高度 h 处的密度向量，则：

$$\rho(h)=(\rho_0(h),\rho_1(h),\rho_2(h))$$

式中，指标表示单位种类，所有的向量都是正值；函数用来测量实际系统容积和表面容积之间的差值。

$$V(\rho(h))=M[\rho_0(h)+\rho_1(h)+\rho_2(h)-1]$$

式中，M 是一个正值的常数。

土层的生长可以用下面系统的一阶微分方程来表示：

$$\frac{d\rho_0(H)}{dt}=-V[\rho(H)]\rho_0(H)$$

$$\frac{d\rho_1(H)}{dt}=-V[\rho(H)]\rho_1(H)+aP_1(H)\rho_1(\phi)-b\rho_1(H)$$

$$\frac{d\rho_2(H)}{dt}=-V[\rho(H)]\rho_2(H)+cP_2(H)\rho_2(\phi)-d\rho_2(H)$$

$$\frac{d\rho_0(\frac{1}{2}H)}{dt}=-V[\rho(\tfrac{1}{2}H)]\rho_0(\tfrac{1}{2}H)$$

$$\frac{d\rho_1(\frac{1}{2}H)}{dt}=-V[\rho(\tfrac{1}{2}H)]\rho_1(\tfrac{1}{2}H)+aP_1(\tfrac{1}{2}H)\rho_1(\phi)-b\rho_1(\tfrac{1}{2}H)$$

$$\frac{d\rho_2(\frac{1}{2}H)}{dt}=-V[\rho(\tfrac{1}{2}H)]\rho_2(\tfrac{1}{2}H)+cP_2(\tfrac{1}{2}H)\rho_2(\phi)-d\rho_2(\tfrac{1}{2}H)$$

$$\frac{d\rho_0(\phi)}{dt}=-V[\rho(\phi)]\rho_0(\phi)$$

$$\frac{d\rho_1(\phi)}{dt}=-V[\rho(\phi)]\rho_1(\phi)+e[P_1(H)+\rho_1(\tfrac{1}{2}H)]\rho_1(\phi)-f\rho_1(\phi)$$

$$\frac{d\rho_2(\phi)}{dt}=-V[\rho(\phi)]\rho_2(\phi)+g[P_2(H)+\rho_2(\tfrac{1}{2}H)]\rho_2(\phi)-h\rho_2(\phi)$$

式中，指数 0 表示空种类，1 和 2 是各自植物物种的竞争；正常数 a，b，c，d，e，f，g 和 h 是估算的参数；函数 $P_i(h)$的正值表示系统的输入变量，即决定了在控制光照的条件下的生长量。

(2) 每日潜在光合作用(R_{pl})：

$$R_{pl}=\int_{t_r}^{t_s}r(\bar{S}_t)dt\Big/\int_{t_r}^{t_s}r(S_t)dt$$

式中，S_t 表示在时间 t 的未遮蔽状态；$\bar{S}_t$ 表示相应的遮蔽状态。

光合作用对光的依赖性为：

$$r(I)=r_{max}I/(I+a)$$

式中，r 是光合作用率；r_{max} 是最大的光合作用率；I 是光照强度；a 是对应于 $0.5r_{max}$ 的光照强度。

草原生产者和消费者的多物种模拟模型

White E G：草原生产者和消费者的多物种模拟模型Ⅱ－生产者，Ecological Modelling, 1984, 24

(1) 草原的非生物子模型：

1) 积雪和冰雪融水可能改变每天的降水记录(R_a)、直立草本植物的雨水截留(I_s)和到达土壤的降水(R_1)：

$$R_a = R_a - (S_a + S_R)S$$

$$I_s = 0.0 \quad (S_A > 0.5P_h)$$

$$R_1 = \begin{cases} R_a - I_s + S_B s - I_1 & (S_A < R_a / s) \\ 0.0 & (S_A > R_a / s) \end{cases}$$

式中，S_a是当前降雪；S_R是自从上一次 R_a>0.0 以来的累积降雪；s 是新鲜雪的水容量；S_A 是当前雪深度；S_B 是自从上一天以来的陈旧积雪深度的减少；I_1 是枯枝落叶的降水截留；P_h是植物的植冠高度。

2) 每日根增长度 (T_g)：

$$T_g = \begin{cases} \left(1/\sum_{i=1}^{i} H_i\right)\sum_{i=1}^{l}(T_i - T_s)H_i & (T_i > T_s) \\ 0.0 & (T_i < T_s) \end{cases}$$

式中，T_i是第 i 土层的平均每日土壤温度；H_i是存活根在相应土层的蒸腾作用的水分吸收系数；l 是根部活动的最低层；T_s是一个由每个活性土层中的根部功能质量来衡量的平均土壤温度边界。

3) 最大植冠温度(C_m)：

$$C_m = \begin{cases} T_x + 0.027(R_c P_P - 300) & (R_c P_P < 300) \\ T_x & (R_c P_P > 300) \end{cases}$$

式中，R_c是植冠上的短波太阳辐射；P_P是到达植冠的植物表面辐照度。

(2) 生产者子模型：

对于组织 x 的基本每日碳分配 C_x 为：

$$C_x = C_p[X_B(L_b + U_b) - X_x]/X_T$$

式中，C_p是碳储存的每日增加量；X_B是相关比率的所有组织的质量总和；X_x是当前组织 x 的质量；X_T是所有植物组织质量的总和；U_b和 L_b 分别是实际生物量的上限值和下限值。

(3) 光合作用：

土壤水潜势和植冠大气温度对于净光合作用曲线的有限高度的相互作用 μ 可表达为：

$$\mu = 1 - \psi_I / \psi_0$$

式中，ψ_I 是集成的土壤水潜势；ψ_0 是净光合作用变成零时的有限的土壤水潜势。

t 时刻蠓捕获数 y_t 回归模型

潘惠琦，宋关鸿：吸血蠓夜间诱捕数量数学分析的初步探讨　生态学杂志，1984，3

$$y_t = b_0 + \sum_{i=1}^{N} b_i x_{i,t} + V_t$$

式中，x_i 为光照度。

Lotka Volterra 竞争方程

王孝安：马衔山青杆林线性演体初探　生态学杂志，1985，2

$$\frac{dN_i}{dt} = r_i N_i \left(\frac{K_i - N_i - \sum_{i \neq j}^{n} \alpha_{ij} N_j}{K_i} \right)$$

式中，n 为种数；r_i 为种 i 的内禀增长率；K_i 为它的容纳量；N_i 为它的相对重要性值；α_{ij} 为竞争系数。

资源有限捕食物种的标准方程和修正方程

Loman J：领地对竞争的捕食者的稳定性和共生的影响模拟研究　Ecological Modelling, 1985, 27

(1) 标准方程：

$$dV/dt = Vr_{max(v)}(1 - V/K) - F_p P - F_q Q$$

$$dP/dt = P(b - d)$$

$$b = \frac{F}{F_{max}}\left(b_{max} - r_{max}\frac{P}{K_i}\right)$$

$$b_{max} = r_{max} + d$$

$$F = \frac{F_{max} V}{F_r + V}$$

式中，b 是捕食者的出生率；d 是当没有食物可用时捕食者的死亡率；F 是捕食者的捕食率（每个捕食者个体的捕食单位和时间单位)；F_{max} 是捕食者的最大捕食率；F_r 是功能反应方程的参数；K 是捕食种群的承载力；K_i 是捕食者领土指数(当捕食密度无限时捕食者种群趋近的密度)；P 和 Q 是捕食者种群的密度；r 是个体增长率；r_{max} 是内在增长率；V 是捕食种群的密度。

(2) 修正后的方程：

$$dV/dt = Vr_{max(v)}(1 - V/K) - F_p P - F_q Q$$

$$dP/dt = P_{max}(r_t - d)$$

$$r = r_{max(p)}\left(2 - \frac{F_{max}}{F}\frac{P+K_i}{K_i}\right)$$

$$F = \frac{F_{max}V}{F_r + V}$$

基于营养动态理论的捕食行为模型

Cui Q, Lu F：基于营养动力学理论的捕食行为的数学模型. Ecological Modelling, 1985, 28

(1) 考虑单个种群生长的方程：

$$\frac{dX}{dt} = \mu_c X \frac{1 - X/X_m}{1 - X/X'_m}$$

式中，X 是在时间 t 的种群密度；μ_c 是种群增长的速率参数；X_m 是有限的营养供应下的最大种群密度；X'_m 是参数。

$$X'_m = (K + S_m)/a$$

式中，K 是达到最大增长率的一半时需要的营养浓度；S_m 是营养物供应的最大浓度；a 是将营养物浓度转换成种群密度的转换系数。

(2) 捕食者增长和被捕食者种群密度之间的简单营养关系：

$$\frac{dX}{dt} = \mu_c X \frac{1 - X/X_m}{1 - X/X'_m} - \mu_2 \frac{XY}{K + X}$$

$$\frac{dY}{dt} = \mu'_2 \frac{XY}{K + X} - \mu_3 Y$$

式中，Y 是捕食者种群；μ_2 是捕食过程的速率常数；μ'_2 是同化过程的速率；μ_3 是捕食者种群的自然死亡率。

(3) 理论的非琐碎平衡点：

$$X_e = \frac{\mu_3 K}{\mu'_2 - \mu_3}$$

$$Y_e = \frac{\mu_1 \mu'_2 K\{1 - \mu_3 K/[X_m(\mu'_2 - \mu_3)]\}}{\mu_2(\mu'_2 - \mu_3)\{1 - \mu_3 K/[X'_m(\mu'_2 - \mu_3)]\}}$$

树木生长模型

Dale V H, Doyle T W, Shugart H H：树木生长模型的比较. Ecological Modelling, 1985, 29

1. 森林生长方程

(1) Leak 和 Graber (1976)：

$$D_{IN} = 7.3833 + 0.0176D_{BH} - 0.0215D_{BH}^2/1000 - 0.2881B_A + 0.0024B_A^2$$

(2) Solomon (1981)：

$$V_1 = \delta_0 + \delta_1 h_i + \delta_2 h_i^2$$

(3) Beck (1974)：

$$\ln(D_G + 1) = b_0 + b_1 SA^{-2} + b_2/D_{BH} + b_3 C$$

(4) Arney (1971)之后的 Hegyi (1974)：

$$D_1 B_i = 1.01237 + 0.1576L_i - 0.0094A_i$$

(5) Belcher 等人(1982)：

$$D_{IN} = (d_1 + d_2 D_{BH}^{d_3} + d_4 S \cdot CR \cdot D_{BH}^{d_5}) \times \{Y_{int}\{1 - \exp\{-B_0[(B_{A\max} - B_A)/B_A]^{0.5}\}\}\}$$

(6) Lemmon 和 Schumacher (1962)：

$$\lg Y = g_{10} + g_{20}S + g_{30}B_D + g_{40}B_1 + g_{50}\lg D_H + (g_{11} + g_{21}S - g_{31}B_D + g_{41}\lg D_H)(1/A) + (g_{13} + g_{23}S - g_{33}B_D + g_{43}\lg D_H)(1/A)^2$$

(7) Ek 和 Monserud (1974)：

$$D_{IN} = B_7(1,M)\{1 - \exp[-B_7(2,M)/(1 + C_{IA})^{B_7(3,M)}]\} \times [(H(1) - \text{Bole}(1))/H(1)]^{B_8(5,M)} \times (D_{POT} - D_{INV})[1 + W_{NOISE}(2)]$$

式中，
$$D_{POT} = \begin{cases} B_2(1,M) + B_2(2,M) \times (H_{POT} - H_{DMEAS})^{B_2(3,M)} & (H_{POT} > H_{DMEAS}) \\ 0 & (\text{其他}); \end{cases}$$

$$H_{POT} = B_1(1,M)S(M)\exp[B_1(2,M) \times \{1 - \exp[-B_1(3,M)A_{POT}]\} \times \exp[B_1(4,M)S(M)]^{B_1(5,M)}];$$

$$D_{INV}=\begin{cases}B_2(1,M)+B_2(2,M)\times\\(H_{TEMP}-H_{DMEAS})^{B_2(3,M)}\\\quad H_{TEMP}>H_{DMEAS}\\0\quad H_{TEMP}<H_{DMEAS};\end{cases}$$

$$H_{TEMP}=\begin{cases}0.999B_1(1,M)S(M)^{B_1(2,M)}\\\quad H(i)>B_1(1,M)S(M)^{B_1(2,M)}\\H(i)\quad 其他;\end{cases}$$

$$A_{POT}=\lg\{1.0-[H_{TEMP}/[B_1(1,M)S(M)]]\times \exp[[B_1(2,M)]\exp[(1/(B_1(2,M))\times S(M))^{B_1(5,M)}]]/[-B_1(3,M)]\}。$$

森林生长模型中的符号：D_{IN} 是直径的增量；D_{BH} 是胸高直径；B_A 是基部面积；V_i 是第 i 高度的累积树干体积的增长；h_i 是地面上的第 i 高度；$\delta_0, \delta_1, \delta_2$ 是回归预测的生长系数；D_G 是 5 年的直径增长；S 是生境指数；A 是初始年龄；C 是竞争指数；b_0，b_1，b_2 和 b_3 是回归程序计算的系数；D_{IB_i} 是离树梢距离为 L_i 处的直径；L_i 是从树梢到 D_{IB} 测量处的以英尺为单位的长度；A_i 是在 D_{IB} 测量点处以年为单位的年龄；C_R 是树冠比率代码；d_1, d_2, d_3, d_4 和 d_5 是特定物种的回归系数；Y_{int} 是对 y 的截留，被用作生长潜力中的误差修正因子；$B_{A_{max}}$ 是对于物种可预测的每英亩中的最大基部面积；B_0 是一个把树木的实际直径和平均直立直径相关联的函数；Y 用来表示一棵树在 5 年和 10 年期间的每年生长量；D 是一棵树当前的胸高直径；H 是树木目前的总高度；A 是树木目前的年龄；B_D 是领地周围的基部面积；H_{DMEAS} 是测量直径的高度；B 是净树干长度；$H(I)$ 是初始高度；C_{IA} 是用忍耐力调整了的竞争指数；$W_{NOISE}(2)$ 是相关的随机变量；$S(M)$ 是索引年龄中的平均优势高度；$B_1(J,M)$ 是高度-年龄方程；$B_2(J,M)$ 是开放生长的直径-高度方程的参数；$B_7(J,M)$ 是用竞争调整直径增加量的参数；$B_8(J,M)$ 是用竞争调整高度增加量的参数。

2. 群落动态增长方程

(1) 基于合成代谢和分解代谢率的增长率(Pienaar 和 Turnbull (1973)根据 Von Bertalanffy (1951))——增长的潜在速率：

$$B_t=A\{1-\exp[-K(t-t_0)]\}^{1/(1-M)}$$

式中，B_t 用于基部的面积、高度和体积；A 是 B_t 的渐近线的值；K、t_0 和 M 是迭代过程产生的适合数据的参数值。

(2) 没有倍增限制的增长 (Phipps(1979))：

1) 直径增量：

$$i_n=A_n\left\{\frac{r_{n-1}}{p}[(r_{n-1}^2+GH)^{0.5}-r_n]\right\}$$

2) 拥挤、遮蔽和遮蔽忍耐力：

$$G=tM(r_n^2-r_1^2)/n$$

3) 土壤湿度：

$$H=1-0.05511(T-W)^2$$

式中，i_n 是第 n 环增长的宽度；r_{n-1} 是距离前一环外围的半径长度；P 是在圆环从圆锥形变成抛物面形的变形点处的半径长度；H 是湿度影响的倍增乘数；G 是拥挤乘数；n 是被测圆环的数量；M 是树干密度的参数；t 是遮蔽忍耐力参数；T 是取样点的地下水位深度；W 是物种的最佳地下水位深度；A_n 是比较 100 年时间序列的实际圆环宽度和理论圆环宽度比率得出的气候噪音乘数。

(3) 有倍增限制的增长——最佳增长方程：

1) Botkin 等人(1972)：

$$D_{gro_1}=\frac{G\cdot D_{BH}[(1-D_{BH}H_T)/(D_{max}H_{max})]}{274+3b_2D_{BH}-4b_3D_{BH}^2}$$

2) Dale 和 Hemstrom (1984)：

$$D_{gro_2}=\frac{b_1F_{bio}{}^{b_4}[(1-D_{BH}H_T)/(D_{max}H_{max})]}{274+3b_2D_{BH}-4b_3D_{BH}^2}$$

式中，D_{gro} 是最佳直径增长；H_T 是树木的高度；D_{max} 是物种的最大直径；H_{max} 是物种的最大高度；G 是物种的增长参数；$b_2=2(H_{max}-D_{BH})/D_{max}$；$b_3=(H_{max}-D_{BH})/(D_{max})^2$；$F_{bio}$ 是树叶生物量；b_1 是参数。

3) 光对直径增长的影响(Botkin 等人, 1972)：

$$D_{LIT}=1-\exp[t_1(A_1-t_2)]$$

式中，A_1 是一棵树木接收到的有效光照；t_1,t_2 是特定物种或物种组的光照影响参数。

4) 温度对直径增长的影响(Botkin 等人, 1972)：

$$D_{TEMP}=\frac{4(D_{EGD}-D_{min})(D_{max}-D_{EGD})}{(D_{max}-D_{min})^2}$$

式中，D_{EGD} 表示积温(℃·d) D_{min} 是一个物种能够忍受

的积温的最小值；D_{max} 是一个物种能够忍受的积温的最大值。

(4) 水应力对直径增长的影响：

1) Solomon 和 Shugart (1984)：

$$D_{WAT_1} = 1 - F_J/[T_{GS}D_3(i)]$$

2) Pastor 和 Post：

$$D_{WAT_1} = \begin{cases} \sqrt{1 - F_J/[T_{GS}D_3(i)]} \\ \quad (T_{GS}D_3(i) > F_J) \\ 0 \quad (其他) \end{cases}$$

3) Reed 和 Clark (1979)：

$$D_{WAT_3} = \begin{cases} \dfrac{(P_{MS} - a_w)(W_{min} - P_{MS})}{(O - a_w)(W_{min} - O)} \times \\ \qquad \exp\dfrac{W_{min} - O}{O - a_w} \\ \qquad (a_w < P_{MS} < W_{min}) \\ 0 \qquad (其他) \end{cases}$$

式中，F_J 是每个生长季节的干燥天数；T_{GS} 是生长季节的长度；D_3 是一个物种能够忍受的土壤湿度在萎蔫点以下的生长季节的比例；P_{MS} 是负的木质部水势；W_{min} 是物种水应力的最小值；O 是对于生长的最佳木质部水势；a_w 是负的 x 截留。

(5) 营养压力和直径增长：

1) Aber 等人(1979)根据 Mitchell 和 Chandler (1939)：

$$D_{NUT_1} = a_N + b_N\{C_N\{1 - 10\exp[-d_N(N + f_N)]\}\}$$

2) Weinstein (1982) 根据 Mitchell 和 Chandler (1939)：

$$D_{NUT_2} = g_N + (h_N + R_{NA}) + (K_N R_{NA^2})$$

式中，N 是相对的氮可用性；a_N，b_N，C_N，d_N，f_N，g_N，h_N 和 k_N 是物种组的参数；R_{NA} 是如果树木生长不受营养条件的限制，可交换的营养储量将要减少的比例。

3. 竞争指数的数学表达式及其作者

(1) 立地密度的度量：

1) Beck (1974)：

$$\rho_{Beck} = \sum_{j=1}^{n} B_{Aj}$$

2) Botkin 等人(1972)：

$$\rho_{Bo} = 1.0 - S_{bio}/S_{oilc}$$

(2) 影响区域的重叠：

1) Gerrard (1969)：

$$\eta_{Ger} = 1/A_i \sum_{j=1}^{n} O_{ij}$$

2) Bella (1971)：

$$\eta_{Bella} = \sum_{j=1}^{n} O_{ij}/A_i(D_j/D_i)^{Ex}$$

(3) 距离加权大小的比率：

1) Hegyi (1974)：

$$D_{He} = \sum_{j=1}^{n} D_j/D_i 1/D_{ST_{ij}}$$

2) Daniels (1976)：

$$D_{Dan} = \sum_{j=1}^{n} (D_j/D_i)^2 \cdot 1/D_{ST_{ij}}$$

3) Monserud 和 Ek (1977)：

$$D_{Mon} = \sum_{j=1}^{n} D_j/D_i e^{-c \cdot D_{ST_{ij}}/(C_{R_i} + C_{R_j})}$$

(4) 生长空间多边形(Doyle, 1983)：

$$S_D = \sum_{j=1}^{n} \frac{\theta_{ij}}{360} \cdot \left(\frac{D_i}{D_i + D_j} D_{ST_{ij}} C_{R_i}\right)^2$$

式中，B_{Aj} 是第 j 竞争者的基部面积；n 是竞争者的总数；S_{bio} 是总的立地基部面积；Q_{soil} 是有记录的森林基部面积的最大值；A 是影响区域的面积；O 是重叠的面积；D 是 D_{BH}；E_X 是指数因子；D_{ST} 是树木之间的距离；c 是估算竞争速率的参数；C_R 是开放增长树冠半径；θ 是竞争者对其影响者的树冠影响的叶腋内角度。

资源重叠指数

Loman J：重叠指数作为竞争系数的应用——使用野外资料检验. Ecological Modelling, 1986, 34

MacArthur (1972) 提出：

$$a = \frac{A_j}{A_i} \frac{\sum_k [(p_{ik} p_{jk} / f_k^2)(b_{ik} K_k / r_k)]}{\sum_k [(p_{ik}^2 / f_k^2)(b_{ik} K_k / r_k)]}$$

式中，a 是物种 i 和 j 之间的资源重叠指数；A_i 是每单位时间捕食者 i 吃掉的被捕食者样本的数量；p_{ik} 是在以被捕食者 i 为食的捕食者中、捕食者 k 所占的个体比例；f_k 是环境中被捕食者 k 的个体相对丰富度；b_{ik} 是单个或每单位被捕食者 k 对捕食者 i 来说的价值；K_k 是被捕食者 k 的环境承载力；r_k 是环境中被捕食者 k 的最大增长率。

上式可化简为：

$$a_{14} = \frac{A_j}{A_i} \frac{\sum_k (p_{ik} p_{jk} b_{ik})}{\sum_k (p_{ik}^2 b_{ik})}$$

单种捕食者-单种猎物系统模型

周集中，陈常铭：拟环纹狼蛛对褐飞虱的捕食作用及其模拟模型的研究Ⅱ.单种捕食者-单种猎物系统的模拟模型及其稳定性分析．生态学报，1986，6(3)

$$\begin{cases} N_{t+1} = N_t \exp\left[r(1 - N_t / D)\right]\left[1 + \dfrac{aTdp_t^{1-m}}{k(1 - aT_h N_t)}\right]^{-k} \\ p_{t+1} = ap_t\left\{\dfrac{N_t}{p_t}\left[1 - \left(1 + \dfrac{aTdp_t^{1-m}}{k(1 + aT_h N_t)}\right)^{-k}\right] - \beta\right\} + xP_t \end{cases}$$

式中，a 为攻击率；T_h 为捕食者处置单个猎物所需的时间；T 为捕食者总可利用时间；m 为捕食者个体间相互干扰参数；x 为依他度；N_t、N_{t+1}、P_t 和 P_{t+1} 分别为猎物和捕食者在第 t 带和 $t+1$ 代的数量；r,D 分别为捕食者不存在时猎物的内禀增长率和环境容纳量；β 为捕食者用于生长和维持新陈代谢所需的最低能量阈值，

以营养动力学为基础的捕食-食饵模型

贾永年，李治明，郭治中等：以营养动力学为基础的捕食模型的讨论．生态学杂志，1986，5(4)

$$\frac{dx}{dt} = \mu_1 x \frac{1 - \dfrac{x}{x_m}}{1 - \dfrac{x}{x_{m'}}} - \mu_2 \frac{xy}{k + x}$$

$$\frac{dy}{dt} = \mu_2' \frac{xy}{k + x} - \mu_3 y$$

式中，x 为食饵种群的密度；y 为捕食者种群的密度；μ_1，μ_2，x_m，$x_{m'}$，μ_2'，μ_3 和 k 均为正常数，k 为捕食效率参数。

捕食者对第 i 种猎物的捕食比例 Q_i

周集中，陈常铭：捕食者对猎物选择性的数学测定方法．生态学报，1987，7(1)

$$Q_i = \frac{1 + c_i'}{1 - c_i'} F_i^{S_{i+1}}$$

式中，c_i' 为捕食者对第 i 种猎物的喜好型；F_i 为第 i 种猎物的比例；S_{i+1} 为捕食者对第 i 种猎物的转换程度。

捕食者的发育速率(1/d)

赵鼎新：黑襟毛瓢虫对棉蚜的数值反应．生态学报，1987，7(2)

$$\frac{1}{d} = \begin{cases} 0 & (X < B) \\ F(X(N)) & (X > B) \end{cases}$$

式中，X 为捕食者摄取的生物量；N 为猎物密度；$F(X(N))$ 为一可以是线性或其他形状的函数。

样本成数与平均覆盖率

邵际兴：白水江自然保护区大熊猫的主食竹类及灾情调查．生态学杂志，1987，6(3)

(1) 各地类的样本成数 P_i：

$$P_i = \frac{n_i}{n}$$

式中，$n = \dfrac{t^2(1-p)}{E^2 p}$，为总体样本单元数，$p$ 为面积最小地类的总体成数，t 为可靠性指标，E 为允许的相对误差；n_i 为各地类样本单元数。

(2) 平均覆盖率 $\overline{P}$：

$$\overline{P} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_i$$

捕食作用率模型

周集中，陈常铭：拟环纹狼蛛对褐飞虱的捕食作用及其模拟模型的研究Ⅲ．选择捕食作用．生态学报，1987，7(3)

$$N_{ai}=\frac{TdP^{1-m}\sum_{i=1}^{n}a_iF_i\sum_{i=1}^{n}N_i}{1+\sum_{i=1}^{n}a_iF_i\sum_{i=1}^{n}T_{hi}F_i\sum_{i=1}^{n}N_i}\frac{1+c_i'}{1-c_i'}F_i^{S_i-1}$$

式中，N_{ai}为捕食者捕获第 i 种猎物的数量；N 为猎物密度；P 为捕食者数量；a 为寻找效率；m 为干扰参数；T 为捕食者总可利用时间；d 为常数；T_h 为处置时间；c' 分别为捕食者对猎物的伪喜好性；s 分别为捕食者对猎物的转换程度。

食物消耗量及其利用模型

李鸿昌，王征，陈永林：典型草原三种蝗虫成虫期的食物消耗量及其利用的初步研究．生态学报，1987，7(4)

(1) 蝗虫成虫期个体平均寿命模型：

$$\overline{L}=\frac{\sum_{i=1}^{n}iN_i}{N_t}$$

式中，i 为个体寿命的天数；N_i 为寿命为 i 天的个体数；N_t 为实验种群的个体数。

(2) 成虫历期内的平均个体累积食量模型：

$$\overline{Q_a}=\sum_{i=1}^{n}\overline{Q_i}$$

式中，n 为实验种群中，个体平均寿命($\overline{L}$)的天数；$\overline{Q_i}$ 为实验种群中，个体在平均寿命范围内，第 i 天的平均食物消耗量。

步甲捕食的功能反应模型

苏祥瑶，林昌善：粘虫危害小麦的动态经济阈值的研究．生态学报，1987，7(4)

$$N_a=\frac{a(DD)N}{1+T_a(DD)N}f(T)$$

式中，N_a为被捕食的动物数；N 为猎物的初始密度；$a(DD)$为瞬时攻击率，是猎物年龄(以日度 DD 计)的函数；$T_a(DD)=a(DD)T_h(DD)$，$T_h(DD)$ 为处理时间；$f(T)=\frac{1}{1+b(T-T_f)^2e^{c(cT-T_i)}}$，$T$ 为温度；b,c 和 T_f 均为正的参数，且 T_f 的生物学意义为步甲攻击力最大时的温度。

单种捕食者——两种猎物系统模型

周集中，陈常铭：拟环纹狼蛛对褐飞虱的捕食作用及其模拟模型的研究Ⅳ．单种捕食者——两种猎物系统的模拟模型及其稳定性分析．生态学报，1987，7(4)

$$\begin{cases}N_{1,t+1}=N_{1,t}\exp[r_1(1-N_{1,t}/D_1)]f_1(N_{1,t},N_{2,t},P_t)\\ N_{2,t+1}=N_{2,t}\exp[r_2(1-N_{2,t}/D_2)]f_2(N_{1,t},N_{2,t},P_t)\\ P_{t+1}=P_t\left\{\frac{a_1N_{1,t}}{P_t}[1-f_1(N_{1,t},N_{2,t},P_t)]+\frac{a_2N_{2,t}}{P_t}\cdot\right.\\ \qquad\left.[1-f_2(N_{1,t},N_{2,t},P_t)]-(a_1F_1+a_2F_2)\beta\right\}+xP_t\end{cases}$$

式中，

$$f_1(N_{1,t},N_{2,t},P_t)=\left[1+\frac{TdP_t^{1-m}\sum_{i=1}^{2}a_iF_i}{k_1(1+\sum_{i=1}^{2}a_iF_i\sum_{i=1}^{2}T_{hi}F_i\sum_{i=1}^{2}N_i)}\times\frac{1+c_1'}{1-c_1'}F_1^{(S_1+1)}\right]^{-k_1};$$

$$f_2(N_{1,t},N_{2,t},P_t)=\left[1+\frac{TdP_t^{1-m}\sum_{i=1}^{2}a_iF_i}{k_2(1+\sum_{i=1}^{2}a_iF_i\sum_{i=1}^{2}T_{hi}F_i\sum_{i=1}^{2}N_i)}\times\frac{1+c_2'}{1-c_{21}'}F_2^{(S_2-1)}\right]^{-k2};$$

a 为捕食者对猎物 1、猎物 2 的寻找效率；T_{h1},T_{h2} 分别为捕食者处置猎物 1、猎物 2 所需的时间；T 为捕食者总可利用时间；m 为捕食者个体间相互干扰参数；d 为常数；x 为依他度；$N_{1,t}$、$N_{1,t+1}$、$N_{2,t}$、$N_{2,t+1}$、P_t和 N_{t+1} 分别为猎物 1、猎物 2 和捕食者在第 t 带和 t+1 代的数量；r_1、D_1、r_2和 D_2分别为捕食者不存在时猎物 1、猎物 2 的内禀增长率(r)和环境容纳量(D)；β 为捕食者用于生长和维持新陈代谢所需的最低能量阈值；c_1'和 c_2'分别为捕食者对猎物 1、猎物 2 的伪喜好性；s_1 和 s_2分别为捕食者对猎物 1、猎物 2 的转换程度。

改进的 Holling 圆盘方程

汪世泽：Holling 圆盘方程的改进，生态学杂志，1987，6(6)

$$N_A=\frac{a'TN}{1+a'(T_E'+bN)N}$$

式中，N_A 为捕食性天敌攻击的猎物数；T_E'为纯处理时间，可以理解为捕食者无厌食反应的处理时间；b 为厌食系数；N 为猎物密度；T 为总时间；a' 为发现面积与搜索时间的比。

标准化的捕食比率

Murtaugh P A：在模拟被捕食者选择性中 Neomysis Mercedis 使用的 logistic 回归方法．Ecological Modelling, 1988, 43

如果 p_i 是被捕食者类型 i 在食物构成中相对的出现次数，d_i 是它在环境中相对的出现次数，那么类型 i 的标准化的捕食比率为：

$$\frac{p_i / d_i}{\sum_{i=1}^{n}(p_i / d_i)}$$

式中，n 是被捕食者类型的总数。

冬小麦产量和杂草密度关系的多变性模型

Cousens R, Firbank L G, Mortimer A et al：冬小麦和可可的产量和杂草密度之间关系的多变性．The Journal of Applied Ecology, 1988, 25

（1）由 Watkinson (1981)提出的模型 A：

$$y_c = \frac{wN_c}{[1 + a(N_c + \alpha N_w)]^b}$$

式中，y_c 是每单位面积上农作物产量的量度；N_c 和 N_w 分别是农作物和杂草的密度；w，α，a 和 b 是参数，w 是孤立的农作物的产量，a 是农作物产量对农作物密度响应的方式，α 是一个农作物和杂草等量化的量度，b 是参数，它表明农作物产量在密度高时会降低，并刻画了资源的利用率。

（2）由 Firbank 等人(1984)提出的模型 B。如果农作物密度像通常的谷类作物那样相对较高，则 b=1，模型 A 被简化为：

$$y_c = \frac{w / a}{1 + \alpha N_w / N_c}$$

（3）由 Wilcockson (1977)和 Cousens (1985)提出的模型 C，认为对于某些物种组合，在杂草密度较高时，农作物产量不可能到达零，产量损失为：

$$y_l = \frac{\beta_3 N_w}{1 + \beta_3 N_w / \gamma}$$

产量为：

$$y_c = y_{wf}\frac{1 + (1/\gamma - 1)\beta_3 N_w}{1 + \beta_3 N_w / \gamma}$$

式中，y_{wf} 是自由杂草的产量；γ 是成比例的产量损失的渐进上限；β_3 是当杂草密度达到零时，每单位杂草密度的成比例的产量损失。

植物竞争模型

Wilson J B：投影竞争和根竞争．The Journal of Applied Ecology, 1988, 25

（1）竞争平衡指数 C_b：

$$C_b = \ln\frac{w_{ab} / w_{ba}}{w_{aa} / w_{bb}}$$

式中，w 是每棵植物的下重；a 和 b 是两个研究对象；w_{aa} 是单作中组分 a 的重量；w_{ab} 是与 b 一起种植时 a 的重量。

（2）竞争强度 C_i：

$$C_i = \frac{w_{aa} + w_{bb}}{w_{ab} + w_{ba}} - 1$$

（3）相对总产量 RYT：

$$T_{RY} = \frac{w_{ab}}{w_{aa}} + \frac{w_{ba}}{w_{bb}}$$

（4）相对混合产量 RYM：

$$M_{RY} = \frac{w_{ab} + w_{ba}}{(w_{aa} + w_{bb})/2}$$

Hilborn-Bazykin 方程

Sullivan P J：边界条件、区域长度和扩散速率对于空间异类捕食者－被捕食者系统的影响．Ecological Modelling, 1988,43

$$\frac{\partial x}{\partial t} - D_1\frac{\partial^2 x}{\partial s^2} = k_1 x - k_2 x^2 - \frac{k_3 xy}{k_4 + x}$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} - D_2\frac{\partial^2 y}{\partial s^2} = k_5 y - k_6 y^2 - \frac{k_7 xy}{k_4 + x}$$

式中，x 和 y 分别表示在时间 t 和空间位置 s 处被捕食者和捕食者生物体的密度；参数 D_1 和 D_2 表示本区域内被捕食者和捕食者各自的扩散率；参数 k_i 反映了系统仅仅基于 x 和 y 的和相对于彼此的变化的瞬时速率。

食物网中的捕食行为模型

Legović T：食物网中的捕食行为．Ecological Modelling, 1989,48

（1）一个被捕食者系统中的捕食行为：

$$S^{11}=\frac{vN}{k+N}$$

式中，S^{11}表示系统中特定的捕食行为；v是每个捕食者对被捕食者的最大捕食率；k是半饱和常数；N是被捕食种群的密度。

(2) 一个捕食者－n个被捕食者系统中的捕食行为：

对于第i个被捕食者的特定捕食率：

$$S_i^{n1}=\frac{v_iN_i}{k+N_t}$$

捕食者的总特定捕食率：

$$S_t^{n1}=\frac{\sum_{i=1}^{n}v_iN_i}{k+N_t}$$

式中，$N_t=\sum_{i=1}^{n}N_i$。

(3) 如果最大特定捕食率和半饱和常数都不仅是捕食者的特性，而且也是被捕食者种群的特性，则有：

$$S_i^{n1}=\frac{v_iN_i/k_i}{1+\sum_{j=1}^{n}N_j/k_j}$$

$$S_t^{n1}=\frac{\sum_{i=1}^{n}v_iN_i/k_i}{1+\sum_{j=1}^{n}N_j/k_j}$$

式中，k_i是第i个被捕食者的半饱和常数。

(4) 选择性捕食行为：

$$S_i^{n1}=\frac{w_i(\cdot)v_iN_i/k_i}{1+z}$$

$$S_t^{n1}=\frac{\sum_{i=1}^{n}w_i(\cdot)v_iN_i/k_i}{1+z}$$

式中，$z=\sum_{i=1}^{n}w_i(\cdot)N_i/k_i$，$w_i(\cdot)$是选择性函数。

(5) m个捕食者－一个被捕食者系统中的捕食行为：

每个捕食者的特定捕食率为：

$$S_j^{1m}=\frac{v_jN_j}{k_j+N}$$

所有捕食者的捕食率或者总捕食率为：

$$p_t^{1m}=N\sum_{j=1}^{m}\frac{v_j}{k_j+N}$$

(6) 食物网中的捕食行为：

考察一个含有r个种群的食物网。定义矩阵W(它的元素表示j捕食者对i被捕食者的偏爱度)如下：

$$w_{ij}(\cdot)=\begin{cases}\leqslant 1 & (\text{当第}j\text{捕食者不仅仅捕食第}i\text{被捕食者种群时})\\ =1 & (\text{当第}j\text{捕食者仅仅捕食第}i\text{被捕食者种群时})\\ =0 & (\text{其他情况})\end{cases}$$

第j捕食者的总捕食率为：

$$p_{ij}^{nn}=N_j\frac{\sum_{i=1}^{r}w_{ij}(\cdot)v_{ij}N_j/k_{ij}}{1+\sum_{i=1}^{r}w_{ij}(\cdot)N_i/k_{ij}}$$

当所有的m个捕食者都在时，对第i被捕食者的捕食率为：

$$p_{it}^{nn}=N_i\sum_{j=1}^{r}\frac{w_{ij}(\cdot)v_{ij}N_j/k_{ij}}{1+\sum_{i=1}^{r}w_{ij}(\cdot)N_i/k_{ij}}$$

总捕食率为：

$$p_{tt}^{nn}=\sum_{j=1}^{r}N_j\frac{\sum_{i=1}^{r}w_{ij}(\cdot)v_{ij}N_j/k_{ij}}{1+\sum_{i=1}^{r}w_{ij}(\cdot)N_i/k_{ij}}$$

式中，v_{ij}和k_{ij}分别表示第j捕食者对第i被捕食者种群的最大特定捕食率和半饱和常数。

功能响应模型

夏楚贵：捕食者-猎物功能响应模型研究。生态学报，1990，10(3)

(1) 捕食者的捕食平均绝对速率$\left(\frac{dH_a}{dt}\right)$模型：

$$\left(\frac{dH_a}{dt}\right)=A\frac{H_a}{H_t}f(H_t)$$

式中，A为捕食者与猎物行为常数；H_a，H_t分别为

捕食量和猎物密度；$\frac{H_a}{H_t}$为猎物的死亡率及捕食效应；$f(H_t)$为反映捕食者的不同捕食行为习性的函数。

(2) 捕食者捕食速率与猎物密度无关时的功能响应模型(Holling I 型响应模型)：

$$H_a = \begin{cases} a'H_t^d & (H_t < H_k) \\ a'H_k^d & (H_t > H_k) \end{cases} \quad (0 < d < 1)$$

式中，a'为捕食的攻击速率；d^{-1}为猎物群体防御系数，d^{-1}越大，即表示猎物群体越大，其抗拒捕食的能力越强；H_k为猎物被捕食的密度阈值。

(3) 高猎物密度时的功能响应模型：

$$H_a = a \cdot \exp\left(-\frac{b}{H_t}\right)$$

式中，a为积分常数；$b = AC$，A同上，C为常数，表示捕食平均绝对速率。

(4) Holling Ⅲ 型曲线模型：

$$H_a = a\left(\frac{eH_t}{1+eH_t}\right)^r \quad (r > 1)$$

式中，a为积分常数。

基于碎屑的被捕食者-捕食者模型

Sarkar A K, Mitra D, Ray S et al：基于碎屑的被捕食者-捕食者模型的持久和摆动共存，Ecological Modelling，1991，53

令$B_1(t)$表示在时间t红树林的植物干草的生物量$B_2(t)$表示在时间t微生物的生物量；$B_3(t)$表示在时间t以微生物为食的无脊椎动物捕食者的生物量，则：

$$dB_1/dt = B_1(a_1 - bB_1)$$

$$dB_2/dt = B_2[a_2 - cB_2/bB_1 - eB_3/(K+B_2)]$$

$$dB_3/dt = B_3[-a_3 + eB_2/(K+B_2)]$$

式中，a_1/b是$B_1(t)$的巨大承载力；a_2，a_3，c，e 和 K是参数。

竞争量度、能力与激烈性模型

Snaydon R W：竞争研究的替代品或附加的目的，Journal of Applied Ecology，1991，28

(1) 竞争的量度：

相对生产总量(T_{RY})已经被用作衡量混合生境各组分竞争共同有限资源程度的量度：

$$T_{RY} = (Y_{ij}/Y_{ii}) + (Y_{ji}/Y_{jj})$$

式中，Y_{ii}和Y_{jj}是指在纯生境中生长时，组分i和j的每单位面积产量；Y_{ij}和Y_{ji}是指在含有二者的混合生境中生长时，组分i和j的每单位面积产量。

(2) 竞争能力：

1) 最常用的竞争能力指数之一是相对拥挤系数(C_{RC})，Harper (1977)对它的定义为：

$$C_{RC_{ij}} = (Y_{ij}/Y_{ii})/(Y_{ji}/Y_{jj})$$

2) 另一个常用的竞争能力指数是"侵略性"，McGilchrist 和 Trenbath (1971)首先定义为：

$$A_{ij} = \frac{1}{2}[(W_{ij}/W_{ii}) - (W_{ji}/W_{jj})]$$

式中，W是每棵植物的产量，其他所有名词和下标同上。

3) 侵略性也可以表述为：

$$A_{ij} = (Y_{ij}/Y_{ii}) - (Y_{ji}/Y_{jj})$$

(3) 竞争的激烈性：

1) 在纯生境中，已知密度($C_{AS_{ii}}$)下的竞争的绝对激烈性为：

$$C_{AS_{ii}} = \lg(W_{i0}/W_{ii})$$

式中，W_{i0}是指当在非竞争，即有非常广阔的生存空间的条件下生长时，每棵植物i的产量。

2) 当在包含j(已知密度为$C_{AS_{ij}}$)的混合生境中生长时，物种i经历的竞争的绝对激烈性为：

$$C_{AS_{ij}} = \lg(W_{i0}/W_{ij})$$

3) 竞争的相对激烈性($C_{RS_{ij}}$)：

$$C_{RS_{ij}} = \lg W_{ii} - \lg W_{ij}$$

式中，竞争的相对激烈性是指，在包含j的混合生境中与在纯生境时比较的每棵植物i重量按比例减少的量的多少。

两个拟寄生物的生物学控制模型

Godfray H C J, Waage J K：生物学控制中的预测模型——芒果粉虫 *Fastrococcus invadens* 及其拟寄生物，Journal of Applied Ecology，1991，28

$$\frac{dF_t}{dt} = \lambda R_t - \lambda R_{t-T_F} Z_F(t) - F_t\mu_F - F_t(a_G G_t)^{\beta_G}$$

$$Z_F(t)=\exp\left\{-\left[\int_{t-T_F}^{t}(a_G G_X)\mathrm{d}t\right]^{\beta_G}-(a_G G_t)^{\beta_G}\right\}$$

$$\frac{\mathrm{d}Z_F}{\mathrm{d}t}=Z_F(t)\left[(a_G G_{t-T_F})^{\beta_G}-(a_G G_t)^{\beta_G}\right]$$

$$\frac{\mathrm{d}S_t}{\mathrm{d}t}=\lambda X_R R_{t-T_F}Z_F(t)-X_R\lambda R_{t-T_F-T_S}Z_F(t-T_S)-S_t\mu_S-S_t(a_A A_t)^{\beta_A}$$

$$\frac{\mathrm{d}Z_S}{\mathrm{d}t}=Z_S(t)\left[(a_A A_{t-T_S})^{\beta_A}-(a_A A_t)^{\beta_A}\right]$$

$$\frac{\mathrm{d}R_t}{\mathrm{d}t}=X_R\lambda R_{t-T_F-T_S}Z_F(t-T_S)Z_S(t)-R_t\mu_R-X_R\lambda R_{t-T_F-T_S-T_R}Z_F(t-T_S-T_R)Z_S(t-T_R)Z_R$$

式中，F_t、S_t 和 R_t 分别表示在第一、二和三宿主阶段的时间 t 时的个体数量；G_t 表示成体 *G. tebygi*；J_t 表示幼体 *G. tebygi*；A_t 表示成体 *Anagyrus* sp.，I_t 表示幼体 *Anagyrus* sp.；T_F, T_S, T_r 等是生活周期阶段的长度；μ_F, μ_S, μ_R 等是影响每个阶段的密度无关性死亡率；λ 是每个成体宿主的生育力；$(aP_t)^{\beta}$ 是拟寄生物的瞬时危险性，P 或者是 *G. tebygi*、或者是 *Anagyrus* sp.，a 是搜索效率，β 是拟寄生物攻击中密度依赖性强度的量度；a_A 和 β_A 是通过 *Anagyrus* sp.描述寄生状态的参数；a_G 和 β_G 是通过 *G. tebygi* 描述寄生状态的参数；X_R, X_G 和 X_A 是宿主和两种拟寄生物性别比率；Z_F, Z_S 和 Z_R 等是经过下标指定阶段之后的个体存活概率。

成年拟寄生物的平衡方程与成年宿主的平衡方程有相似的结构，因此对于 *G. tebygi*，有：

$$\frac{\mathrm{d}G_t}{\mathrm{d}t}=X_G F_{t-T_J}(a_G G_{t-T_J})^{\beta_G}Z_J-G_t\mu_G-X_G F_{t-T_J-T_G}(a_G G_{t-T_J-T_G})^{\beta_G}Z_J Z_G$$

对于 Anagyrus sp，则有：

$$\frac{\mathrm{d}A_t}{\mathrm{d}t}=X_A S_{t-T_I}(a_A A_{t-T_I})^{\beta_A}Z_I-A_t\mu_A-X_A F_{t-T_I-T_A}(a_A A_{t-T_I-T_A})^{\beta_A}Z_I Z_A$$

空间自相关的 Moran *I* 统计量

Dessaint F, Chadoeuf R, Barralis G：耕作土壤的种子库中杂草种子的空间模式分析．Journal of Applied Ecology, 1991, 28

$$I=\frac{(1/W)\sum_{i=1}^{Q}\sum_{j=1}^{Q}w_{ij}(x_i-x_m)(x_j-x_m)}{(1/Q)\sum_{i=1}^{Q}(x_i-x_m)^2}$$

式中，x_i 是第 i 核心中的种子数量；x_m 是平均值；w_{ij} 是在核心 i 和 j 之间的权重；W 是所有权重的总和。

简单食物链模型

Wennekers T, Giersch C：简单食物链模型的灵敏度分析．Ecological Modelling, 1991, 54

假定食物链中有 m 个种群，种群密度为 $x_1,\cdots,x_m$，则这个食物链的动力学方程可表达为：

$$\mathrm{d}x_1/\mathrm{d}t=x_1[(a_{10}-a_{11}x_1)-a_{12}x_2]$$

$$\mathrm{d}x_r/\mathrm{d}t=x_r(a_{r,r-1}x_{r-1}-a_{r,r+1}x_{r+1}-a_{r0})\quad(r=2,3,\cdots,m-1)$$

$$\mathrm{d}x_m/\mathrm{d}t=x_m(a_{m,m-1}x_{m-1}-a_{m0})$$

式中，a_{ij} 表示食物链中前后成员的相互作用；a_{r0} 表示第一位的死亡率。

替换率模型

周波：利他行为研究进展．生态学杂志，1991，10(2)

$$w(A)=A_C+A_B(N-1)[r+(1-r)a]$$

$$w(B)=\frac{a}{1-a}A_B(N-1)\{1-[r+(1-r)a]\}$$

式中，$w(A)$ 和 $w(B)$ 分别为 A、B 基因由利他行为所引起的替换率；A_C 为利他者行利他行为时所付出的代价；A_B 为受益者的收益；N 为群体的大小；r 为亲缘系数；a 为有等位基因(利他基因)的概率。

七星瓢虫对麦长管蚜捕食作用及其模拟模型

蔡晓明，阎桂云：七星瓢虫对麦长管蚜捕食作用及其模拟模型的研究．生态学报，1991，11(2)

(1) 七星瓢虫年龄等级对功能反应的影响：

Holling 圆盘方程：

$$N_a=\frac{aTN}{1+aT_hN}$$

式中，N_a 为捕获猎物数；N 为猎物密度；a 为攻击率；T_h 为处理时间；T 为实验时间。

(2) 模拟模型及稳定性的研究：

七星瓢虫-麦长管蚜捕食作用系统的模拟模型：

$$\frac{dN}{dt}=N\left[r\left(1-\frac{N}{K}\right)-\frac{\omega\alpha dP^{1-m}}{1+a\cdot Th\cdot N}\right]$$

$$\frac{dP}{dt}=P\left(\frac{\beta\omega\alpha dNP^{-m}}{1+a\cdot Th\cdot N}-K_0-\frac{K_1}{N+K_2}P\right)$$

式中，N 为蚜虫种群密度；r 为蚜虫内禀增长率；K 为环境负荷量；ω 为由实验室功能反应结果用于田间实验时对捕食作用率的校正系数；d 为考虑干扰反应后引起的校正系数；P 为捕食者密度；β 为捕食者取食猎物后转化为自身部分的比例；K_0 为捕食者种群的最低死亡率；$K_1/(N+K_2)$ 为捕食者种群增大引起的死亡率增加速率；K_1 为常数；K_2 为避免 N 过小时引起死亡率增加速率过大的校正系数。

二次回归旋转组合设计的数学模型

吴进才：稻田三种捕食性天敌与两种害虫共存系统捕食量的研究。生态学杂志，1991，10(3)

$$\hat{Y}=b_0+\sum_{j=1}^{p}b_jx_j+\sum_{i<j}^{p}b_{ij}x_ix_j+\sum_{j=1}^{p}b_{jj}x_j^2$$

式中，$\hat{Y}$ 为共存系统害虫被捕食量的估计值；b_j，b_{ij} 和 b_{jj} 分别为一次项、交互项和二次项系数；p 为参试物种数；x 为参试物种。

食物的组成及食物的选择性模型

陈化鹏，萧前柱：带岭林区马鹿和狍冬季营养对策的比较。生态学报，1991，11(4)

(1) 食物的组成 Horn 指数模型：

$$R_0=\frac{\sum(x_i+y_i)\ln(x_i+y_i)-\sum x_i\ln x_i-\sum y_i\ln y_i}{(X+Y)\ln(X+Y)-X\ln X-Y\ln Y}$$

式中，x_i，y_i 为某种植物在各月食物中所占的比例；X、Y 为各月食物中所有植物种的总量；R_0 为马鹿和狍食物组成的相似程度和月间变化程度。

(2) 食物的选择性指数模型：

$$I_e=\frac{\overline{P_i}-P_i}{\overline{P_i}+P_i}$$

式中，$\overline{P_i}$ 为每种植物被啃食的当年枝数占调查植物种被啃食的当年枝总数的比例(利用量)；P_i 为每种植物当年枝总数占调查植物种当年枝总数的比例(可利用量)。

牲畜种群对生态影响的分形估算模型

Meltzer M I, Hastings H M：利用分形学来估算不断增长的牲畜种群对生态的影响——津巴布韦 Runde 公共土地的案例研究。Journal of Applied Ecology, 1992,29

(1) 本地灭绝率 $r(t)$：

$$r(t)=ct^{1-2H}$$

式中，c 是常数；t 是当前物种持续占据的时间段；H 是测度 $r(t)$ 渐进性的指数，$H>\frac{1}{2}$ 为持久或者稳定过程，$H=\frac{1}{2}$ 为布朗或者随机过程，$H<\frac{1}{2}$ 为不持久或者不稳定过程。

(2) 斑点的累积出现次数：

$$N(A>a)=c'\exp\{-B\ln a+C[f(a)]\}$$

式中，$N(A>a)$ 是比 a 大的地块 A 的数量；c' 是常数；B 和 C 是估计的系数；$f(a)$ 是 a 的函数。

(3) 另一种观点是：

$$N(A>a)=e^{-\frac{b(\ln a)^C}{a_{\min}}}$$

式中，C 的值是在回归计算前预先确定的。

一个捕食者-一个被捕食者系统收获的恒定产量模型

Hogarth W L, Norbury J Cunning I et al：包含收获的捕食者-被捕食者模型的稳定性。Ecological Modelling, 1992,62

$$\frac{ds}{dt}=\gamma s(1-s/K)-\frac{m}{y}\frac{xs}{a+s}-Y_s$$

$$\frac{dx}{dt}=m\frac{xs}{a+s}-dx-Y_x$$

式中，s 是在时间 t 被捕食者的数量；x 是在时间 t 捕食者的数量；γ 是被捕食者的生长率；m 是捕食者的最大生长率；d 是捕食者的死亡率；y 是以被捕食者为食的捕食者的收获转换因子；a 是捕食者的半饱和常数，即功能反应是最大值一半时的被捕食者密度；K 是承载力；Y_s 和 Y_x 分别是被捕食者和捕食者的收获率。

最大的可持续收获量 $Y_x=\frac{mxs}{a+s}-dx$，要受下式的限制，即：

$$Y_s=\gamma s\left(1-\frac{s}{K}\right)-\frac{m}{y}\frac{xs}{a+s}$$

种群生活习性的量度模型

Hugh-Jones M, Barre N, Nelson G, et al：利用 Landsat-TM 辨识瓜德罗普岛上 Amblyomma variegatum 的生活习性 Remote Sensing of Environment, 1992, 40

(1) 用来对种群进行细分的差异量度可表达为：

$$I_{B,C}=\ln\{L_B\}+\ln\{L_C\}-\ln\{L_A\}$$

式中，B 和 C 是集合 A 的细分的子集；L_A(或 L_B 或 L_C)是集合 A 的最大似然度的对数值；$I_{B,C}$ 表示将集合 A 分为子集 B 和 C 获得的信息。

(2) 种群 x_{ij}(个体数为 n，属性数为 m)对应的集合 A 的最大似然度定义为：

$$\ln\{L_A\}=_{1<j<m}[X_{\cdot j}\ln X_{\cdot j}+(n-X_{\cdot j})\ln(n-X_{\cdot j})]-mn\ln n$$

式中，$X_{\cdot j}=\sum_{1<i<n}X_{ij}$，表示具有属性 j 的个体数；信息统计值 $I_{B,C}$ 是最优差异函数。

均质化 Hutchinson 方程

Antonelli P, Lin X, Bradbury R H：Hutchinson 的竞争方程及其均质化-竞争排斥的更高层原则 Ecological Modelling, 1992, 60

$$\frac{dN_1}{dt}=\frac{b_1N_1}{K_1}\left[K_1-N_1-\alpha_{12}N_2-\gamma_1\frac{(N_1N_2^2)^{2/3}}{N_1}\right]$$

$$\frac{dN_2}{dt}=\frac{b_2N_2}{K_2}\left[K_2-N_2-\alpha_{21}N_1-\gamma_2\frac{(N_2N_1^2)^{2/3}}{N_2}\right]$$

式中，N_1 和 N_2 分别是指种群 1 和 2；b_1 和 b_2 分别是种群 1 和 2 的生长系数；K_1 和 K_2 分别是种群 1 和 2 的容量；α_{12} 和 α_{21} 是种群 1 和 2 之间的种间竞争系数；$\gamma_1\frac{(N_1N_2^2)^{2/3}}{N_1}$ 和 $\gamma_2\frac{(N_2N_1^2)^{2/3}}{N_2}$ 表示种群 1 和 2 之间更高层的相互作用。

狩猎影响的数学模型

Middleton D A J, Nisbet RM, Kerr A J：狩猎冬季北极鹅对 Islay 影响的数学模型 Journal of Applied Ecology, 1993,30

$$N_{t+1}=b_t(N_t-cH_t)+S_t(N_t-H_t)$$

式中，N_t 表示在 t 年份 Islay 地区雌性北极鹅的数量；S_t 是一只雌性北极鹅存活到来年冬季的概率 b_t 表示在年份 t 冬季开始时存在的每只雌性北极鹅活到 t+1 年份的年轻的雌性北极鹅的数量；参数 c(从 1 到 2 取值)表示一只雌性北极鹅由于其伴侣被猎杀而在下一个春天不能繁殖后代；H_t 是在 t 年份的冬季被猎杀的雌性北极鹅的数量。

对应于不同的狩猎规则策略，我们提出了 4 种可能的形式：

(a)一个固定的数量：

$$H_t=H$$

(b) 一个固定的每年猎杀雌性北极鹅的比例 a：

$$H_t=aN_t$$

(c) 一个固定的在猎杀临界值之上的雌性北极鹅的部分：

$$H_t=\begin{cases}a(N_t-T) & (N_t>T)\\ 0 & (\text{其他})\end{cases}$$

式中，T 是雌性北极鹅的数量，若低于这个值则不能狩猎；a 是超出猎杀临界值之上的雌性北极鹅的部分；

(d) 和(C)类似，但是要基于前一年份的北极鹅个体数量，即 $H_t=\begin{cases}a(N_{t-1}-T) & (N_{t-1}>T)\\ 0 & (\text{其他})\end{cases}$。

(d) 对于每年固定数量的猎杀，长期的种群生长率：

$$r_t=\lg\left[(b+S)-\frac{H(cb+S)}{N_t}\right]$$

对于每年固定比例的猎杀，长期的种群生长率：

$$r_t=\lg[(b+S)-a(S+cb)]$$

南部松树甲虫消失扩散模型

Turchin P, Thoeny W T：南部松树甲虫标记重捕实验中的定量扩散和扩散模型。Ecological Applications, 1993, 3(1)

$$\frac{\partial u}{\partial t}=D\left(\frac{\partial^2u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2u}{\partial y^2}\right)-\delta u$$

式中，$u(x, y, t)$ 是被标记甲虫的密度分布，它是一个时间坐标 (t) 和两个空间坐标 (x, y) 的函数；D 是扩散速率；γ 是消失速率，它可以被改写为极坐标形式，表达为：$\frac{\partial u}{\partial t}=D\left(\frac{\partial^2u}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r}\right)-\delta u$，其解法为 $C(r)=\frac{\alpha N_0}{2\pi D}K_0\left(\sqrt{\delta/Dr}\right)$，$K_0(z)$ 是一个修正后的第二类贝塞耳函数，N_0 是释放出的甲虫总数，α 是参数，解法方程式可进一步简化为 $C(r)=Ar^{-\frac{1}{2}}\exp(-r/B)$，$A$ 和 B 是参数。

动物的食谱宽度模型

Negi G C S, Rikhari H C, Ram J et al：生活在印度中部喜马拉雅山的高山草甸上的马、绵羊和山羊的觅食特征 Journal of Applied Ecology, 1993, 30

(1) 动物在本区室所包含的植物物种中觅食的食谱宽度如下：

$$B = \frac{1}{\left(\sum_{i=1}^{s} p_i^2\right)s}$$

式中，p_i 是资源形态(一个植物物种) i 的按比例的部分利用；s 是资源形态的数量(植物物种的总数)。

(2) 任何两种被放牧的动物之间的部分相似处可以用 Schoener (1970)表达式计算：

$$\psi_{ij} = 1 - \frac{1}{2}\sum_{h=1}^{s}\left|p_{ih} - p_{jh}\right|$$

式中，ψ_{ij} 是动物物种 i 和 j 的相似程度；p_{ih} （p_{jh}）是形态 h (植物物种的资源形态)中的物种 i (j)的响应部分。

种群中的进化模型

Maxwell T, Costanza R：一种模拟进化的自组织动力学的方法．Ecological Modelling, 1993, 69

$$\dot{N}(i) = -\alpha N(i) + B(N,i)\left[1 - \frac{C(\Gamma, N)}{C(\Gamma', K)}\right]$$

式中，$N(i)$ 是在时间 t，地点 $i = \{i_1, i_2, \cdots, i_{NT}\}$ 处的种群密度；α 是死亡率；$B(N) = r_s N(i) + r_m \sum_{|j|=1} N(i+j)$，$r_s$ 是自我繁殖率，r_m 是突变率，$B(N)$ 是广义出生率；K 是资源分配；$C(\Gamma, N)$ 和 $C(\Gamma', N)$ 是卷积术语，$C(\Gamma, N)$ 是对 N 的局部加权平均，$C(\Gamma', N)$ 是对 K 的局部加权平均

$$C(\Gamma, N) = \sum_{|j|<\Gamma} g_\Gamma(|j|)N(i+j)$$

$$C(\Gamma', K) = \sum_{|j|<\Gamma'} g_{\Gamma'}(|j|)K(i+j)$$

式中，$g_\Gamma(|i|) = \begin{cases} 1 - g_0 |i|^2 \Gamma^2 & |i| \le \Gamma \\ 0 & |i| > \Gamma \end{cases}$；$\Gamma$ 是竞争的最大程度；一般情况下，$g_0 = 0.75$；Γ' 是资源利用的最大程度

时间上离散的随机灭绝模型

Stephan T, Wissel C：时间上离散的随机灭绝模型 Ecological Modelling, 1994, 75/76

(1) 我们通过下面的 Markov 过程来描述随机种群动力学：

$$P_k(t+1) = \sum_{i=1}^{\max} A_{ki} P_i(t) \qquad (t = 0,1,2,\cdots)$$

式中，$P_i(t)$ 是在 t 年份有 i 个个体的概率；数量 $P_0(t)$ 描述了在 t 年份灭绝的危险性；A_{ki} 是在一年中个体数量由 i 转换到 k 的概率。

(2) 当前包含 i 个个体的种群的平均寿命 T_i 可以用下面的线性方程系统计算：

$$T_i = 1 + \sum_{k=1}^{\max} T_k A_{ki} \qquad (i = 1, \cdots, \max)$$

(3) 当前包含 i 个个体的种群的移植概率 R_{ui} 可以被计算。假设我们从 i 个个体开始，最后达到 u 个个体，则我们有：

$$R_{ui} = \sum_{k=u}^{\max} A_{ki} + \sum_{k=1}^{u-1} R_{uk} A_{ki}$$

(4) 跃迁矩阵(A_{ki})如下：

$$A_{ki} = \sum_{j=0}^{i} \sum_{E=0}^{j(R/p)} \sum_{l=0}^{l_{\max}} B_{kl} \xi_{lE} U_{E,ji} W_{ji}$$

式中，W_{ji} 是包含 i 个个体的种群中含有 j 个雌性个体的概率；$U_{E,ji}$ 是包含 i 个个体，式中，有 j 个雌性个体的种群产生 E 个卵的概率；ξ_{lE} 描述了在种群产卵过程中环境波动引起的变异；l 是实际的产卵数；E 是产卵数的平均值；B_{kl} 是 l 个卵中的 k 个达到成年并产生下一代的概率。

空间自相关分布型指数

李天生，周国法：空间自相关分布型指数研究 生态学报，1994，14(3)

(1) 自相关函数及其性质：

自相关函数方差 $\hat{r}(h)$ 模型：

$$\hat{r}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{x_i - x_j = h} \left[Z(x_i) - Z(x_j)\right]^2$$

式中，$N(h)$为相距 h 的点对 (x_i, x_j) 的个数；可用 $\hat{r}(h)$ 的值拟合 $r(h)$模型

常见的 $r(h)$模型有：

线性模型：

$$r(h) = A + Bh \qquad (h > 0)$$

指数模型：

$$r(h)=c_0 \quad e^{-3h/a} \qquad (h>0)$$

球状模型：

$$r(h)=\begin{cases} c_0-c\left[\frac{3}{2}\frac{h}{a}-\frac{1}{2}\left(\frac{h}{a}\right)^3\right] & (0<h\leqslant a) \\ c_0+c & (h>a) \end{cases}$$

高斯模型：

$$r(h)=\begin{cases} 0 & (h=0) \\ c_0+c(1-e^{-3h^2/a^2}) & (h>0) \end{cases}$$

(2) 扩散性指数 I_z 的定义及意义：

扩散性指数 I_z 模型：

$$I_z=\frac{V^2L^2}{a^2m^2+V^2L^2}$$

式中，$I_z\in[0,1]$，a 为相关程；L 为抽样区的半径；V, m 分别为 $Z(x)$ 的方差和。当 I_z 从 0→1 变化时，种群的空间分布从均匀分布→随机分布→聚集分布；I_z 越接近 1，聚集程度越高，扩散性越强。对于完全的均匀分布($a=\infty$)；完全随机分布 $I_z=\frac{1}{1+\left(\frac{a}{L}\right)^2 m^2}$；完全聚集分布($a$=0) I_z=1。

Lotka-Volterra 被捕食者-捕食者双物种系统模型

Matsumoto H, Seno H：关于捕食者入侵包含两种缀块的多缀块环境 Ecological Modelling, 1995, 79

包含两种缀块的 n 缀块环境中的 Lotka-Volterra 被捕食者-捕食者双物种系统模型：

$$\frac{dX_i(t)}{dt}=r_1\left[1-\frac{X_i(t)}{K_1}\right]X_i(t)-b_1X_i(t)Y_i(t) \qquad (1)$$

$$\frac{dY_i(t)}{dt}=-\delta_1Y_i(t)+c_1X_i(t)Y_i(t)-P_1Y_i(t)+\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{k}\frac{S_1P_1}{n-1}Y_j(t)+\sum_{j=k+1}^{n}\frac{S_2P_2}{n-1}Y_j(t) \qquad (2)$$

$$\frac{dX_i(t)}{dt}=r_2\left[1-\frac{X_i(t)}{K_2}\right]X_i(t)-b_2X_i(t)Y_i(t) \qquad (3)$$

$$\frac{dY_i(t)}{dt}=-\delta_2Y_i(t)+c_2X_i(t)Y_i(t)-P_2Y_i(t)+\sum_{j=1}^{k}\frac{S_1P_1}{n-1}Y_j(t)+\sum_{\substack{j=k+1\\j\neq i}}^{n}\frac{S_2P_2}{n-1}Y_j(t) \quad (4)$$

式中，方程(1)和(2)中 $i=1,2,\cdots,k$，方程(3)和(4)中 $i=k+1,\cdots,n$；$X_i(t)$ 和 $Y_i(t)$ 分别是缀块 i 中的被捕食者密度和捕食者密度；r_1 和 r_2 分别是在 1 组和 2 组的缀块中被捕食者的固有生长率；K_1 和 K_2 是承载力；b_1 和 b_2 是被捕食者的被捕食率；δ_1 和 δ_2 是捕食者的死亡率；c_1 和 c_2 是捕食率；P_1 和 P_2 是移出率；S_1 和 S_2 是迁移成功率。

野生和家养草食动物空间行为模型

Fritz H, Garine-Wichatitsky M, Letessier G：非洲萨瓦那林地的野生和家养草食动物的栖息地利用——家畜空间行为的影响。The Journal of Applied Ecology, 1996, 33

(1) 栖息地偏好指数(P_{ik}，对于有蹄类动物 k 和植被类型 i)：

$$P_{ik}=\frac{U_{ik}}{A_i}$$

式中，A_i 是研究区被植被类型 i 覆盖的百分率；U_{ik} 是在植被类型 i 中被记录的有蹄类动物 k 的所有观测值的百分率。指数随着偏好程度的增大，从 0 (完全避免) 经过 1.0 (没有偏好)向更高值变化。

(2) 完全程度的选择性(S_k，有蹄类动物 k)：

$$S_k=\sum_i|U_{ik}-A_i|$$

式中，当所有栖息地与它们覆盖的面积成比例的被使用时，这个指数理论上从 0 变化到 200，这时即使在一个非常小的地块上也能观测到。

(3) 在两种有蹄类动物 j 和 k 之间的栖息地重叠率(O_{jk})为：

$$O_{jk}=\frac{\sum_i U_{ij}U_{ik}}{\sqrt{\sum_i U_{ij}^2\sum_i U_{ik}^2}}$$

式中，O_{jk} 指数描述了一个重叠的百分比，它从 0(没有重叠)变化到 1(完全重叠)。

昆虫散布的 Weibull 分布

Rudd N T, McEvoy P B：朱砂蛾的本地分布 Ecological Applications, 1996, 6(1)

$$f(x)=\alpha\beta^{-\alpha}x^{\alpha-1}e^{-(x/\beta)^{\alpha}}$$

式中，$f(x)$ 是空间位置 x 的昆虫密度；α 是形状因子；β 是比例因子。

外来植物传播模型

Higgins S I, Richardson D M：外来植物传播模型回顾. Ecological Modelling, 1996, 87

(1) Logistic-差分模型：

$$N_{t+1}=N_t\left[1+r\left(1-\frac{N_t}{K}\right)\right]$$

式中，N_{t+1} 是在 $t+1$ 时刻总种群中个体的整数；r 表示特定条件下种群繁殖潜力中单个植物生活史属性的组合效果。

(2) 随机性模型：

$$N_{t+1}=N_t+N_t(r+y_t)-r\frac{N_t^{\ 2}}{K}$$

式中，y_t 是一个随机变量，平均值为 0，方差为 1。

(3) 反动力扩散模型：

$$\frac{\partial u}{\partial t}=ru+D\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)$$

式中，$u(x, y, t)$ 是在 t 时刻，空间坐标 x，y 处生物体的密度；D 是总种群中个体的扩散率或者随机运动率。

(4) 种群动力学的中间种群模型：

$$N_i(t+1)=N_i(t)r_i-\sum_{j=1}^{n}E_{ij}+\sum_{j=1}^{n}E_{ji}$$

式中，n 是种群数量；$N_i(t)$ 在时刻 t 和种群 i 中的个体数量；$r_i(t)$ 是时刻 t 和种群 i 中种群增长的内在速率；E_{ij} 是从种群 i 到种群 j 转移的个体数目。

(5) 基于个体的单元自动控制模型：

一般的单元自动控制模型可以描述为由单元离散数组组成，每一个单元能够呈现有限数量(0, 1,…, N)的状态。为了获得在 $t+1$ [$C_{t+1}(i)$] 时刻第 i 个单元的值，建立的转移规则依赖于单元的前一个状态和数组中其他单元的状态：

$$C_{t-1}(i)=F[C_s(i),C_s(j)]$$

式中，$C_s(j)$ 表示当 $s<t$ 时，前一时段数组中其他单元的状态，它由指数 j 来标识；F 是转移规则。

野生动植物生境最优配置的连通性和空间相关性模型

Hof J, Flather C H：计算野生动植物生境最优配置的连通性和空间相关性。Ecological Modelling, 1996, 88

(1) 连通性：

每一块样地的联合概率(P_{R_i}) 为：

$$P_{R_i}=1-\prod_{j=1}^{M}(1-p_{r_{ij}})$$

式中，$p_{r_{ij}}$ 是样地 i 连通到样地 j 的概率，M 是样地的数目。

第 i 块样地中预期的种群数定义为：

$$E(P_i)=P_{R_i}a_iS_i$$

预期的总种群个体数为：

$$E(P)=\sum_{i=1}^{M}P_{R_i}a_iS_i$$

式中，a_i 是第 i 块样地中完全连通的生境里个体的预期密度；S_i 是第 i 块样地的大小。

(2) 空间相关性：

总的种群变量 $V(P)$为：

$$V(P)=\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{M}\rho_{ij}(\psi P_{R_i}a_iS_i)(\psi P_{R_j}a_jS_j)$$

式中，ρ_{ij} 是样地 i 和样地 j 中种群个体数量之间的相关性；ψ 是不变常数。

森林的死亡率函数

Loehle C, LeBlanc D：基于模型的气候变化对森林的影响评价——临界回顾. Ecological Modelling, 1996, 90

(1) 修正后的死亡率函数考虑了以前增长压抑的时间长度和严重性，如下：

$$M=ce^{-bg}$$

式中，M 是死亡率；c 是基于当前年份的低增长率的危险性常数（这里，所有的先前年份都不直接产生压力）；b 是增长率增大对减小死亡率的影响；g 是增长率。

(2) 所截取的 c 是先前年份增长压抑度的函数：

$$c=f[MA(g)]$$

式中，$MA(g)$ 是在过去 5 到 10 年间增长率的变动平均值，函数 f 能够由数据确定。

Logistic 种群模型

Holt J, Cheke R A：沙漠蝗虫阶段变化模型。Ecological Modelling, 1996, 91

(1) Logistic 种群增长模型的差分方程版本如下：

$$N_{t+1} = N_t \exp[r(1 - N_t / K)]$$

式中，N_t 是在时间 t 的数量；r 是增长的内在速率；K 是环境承载力。

(2) 一个更大面积的种群在异类环境中能够找到更好的地区，假定 K 值随 S 形曲线变化：

$$K_t = w + K_s + (K_g - K_s)/\{1 - \exp[-\alpha_K(N_t - m_K)]\}$$

式中，w 是一个变化范围在 0 到 v 之间的均一分布的随机偏移；v 是一个环境变化参数，它独立于 K_t，K_s 是独居种群的承载力；K_g 是群居种群的承载力，是转换斜率参数；m_K 是转换门槛参数。

$$r_t = r_s + (r_g - r_s)/\{1 + \exp[-\alpha_r(N_t - m_r)]\}$$

式中，r_s 是独居种群增长率；r_g 是群居种群增长率，α_r 是转换斜率参数；m_r 是转换门槛参数。

空间分布回归模型

Li W, Wang Z, Ma Z et al：中国盐城生态保护区丹顶鹤的空间分布回归模型。Ecological Modelling, 1997, 103

(1) Moran 的 I 系数被用来估计空间自相关，公式如下：

$$I = \frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}(X_i - \overline{X})(X_j - \overline{X})}{\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}\right)\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})^2}$$

式中，i 和 j 是任意两个相邻单元；X_i 和 X_j 分别是在单元 i 和 j 中变量 X 的值；$\overline{X}$ 是 X 的平均值；W_{ij} 是 i 和 j 的位置相似性，如果 i 和 j 直接相邻 $W_{ij}=1$，否则为 0；n 是研究区单元的总数。

(2) 主成分回归模型：

为了获取主成分来模拟种群的分布，建立的 logistic 回归模型如下：

$$\lg\frac{P_i}{1-P_i} = a_0 + a_1\mathrm{PC}_{1i} + a_2\mathrm{PC}_{2i} + \cdots + a_n\mathrm{PC}_{ni}$$

式中，P_i 是单元 i 中野生动植物的存在可能性，其值在 0 和 1 之间；a_i 是回归系数；PC_i 是主成分。

$$\mathrm{PC}_i = V_{i1}X_{1i} + V_{i2}X_{2i} + V_{ij}X_{ji} + \cdots + V_{im}X_{mi}$$

式中，V_{ij} 是对应于自变量 X_{ij} 的系数。

小生境适应性模型

Li Z, Li H：农作物产量的小生境适应性模型及其应用。Ecological Modelling, 1997, 104

(1) 环境因子例如阳光、温度、土壤水分、土壤营养等的定量指数标记为 $x_1, x_2, \cdots, x_n$。实验环境下每一组的观测值标记为 $X_t = (x_{1t}, x_{2t}, \cdots, x_{nt})$，$X_t$ 代表农作物的实际资源状态，因子 i 的最佳值记为 x_{ia}，根据下面的公式，数据被标准化：

$$x'_{ji} = x_{ji}\Big/\left(\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}x_{ji}\right)$$

$$x'_{ja} = x_{ja}\Big/\left(\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}x_{ji}\right)$$

$$(i = 1, \cdots, m;\ j = 1, \cdots, n)$$

式中，下标 i 表示实验 i 中的观测值 $\delta'_{ja} = \left|x'_{ji} - x'_{ja}\right|$；

$\delta_{\min} = \min\{\delta_{ji}\} = \min\left\{\left|x'_{ji} - x'_{ja}\right|\right\}$；$\delta_{\max} = \max\{\delta_{ji}\} = \max\left\{\left|x'_{ji} - x'_{ja}\right|\right\}$。

(2) 小生境适应性模型：

$$F_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{\delta_{\min} + \alpha\delta_{\max}}{\delta_{ji} + \alpha\delta_{\max}} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{\min\left\{\left|x'_{ji} - x'_{ja}\right|\right\} + \alpha\max\left\{\left|x'_{ji} - x'_{ja}\right|\right\}}{\left|x'_{ji} - x'_{ja}\right| + \alpha\max\left\{\left|x'_{ji} - x'_{ja}\right|\right\}}$$

$$(i = 1, 2 \cdots, m)$$

式中，F_i 表示实验 i 中农作物的小生境适应性值；α 是模型参数，$\alpha \in [0, 1]$。

疟疾的时间空间动力学模型

Torres-Sorando L, Rodriguez D J：疟疾的空间-时间动力学模型。Ecological Modelling, 1997, 104

(1) Ross-Macdonald 模型：

N 和 M 是分别是人和蚊子的总数，γ 和 μ 分别是人的痊愈率和蚊子死亡率的单个体的比率。每只蚊子

每个人的叮咬率为 β。如果 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 分别是时间 t 被感染的人和蚊子的数量，则系统动力学被表示为：

$$\frac{dX(t)}{dt} = \beta Y(t)[N - X(t)] - \gamma X(t)$$

$$\frac{dY(t)}{dt} = \beta X(t)[M - Y(t)] - \mu Y(t)$$

(2) 转移模型：

假定每单位时间从地块 i 迁往地块 j 的虫口 e_{ij} 不再返回。令 $n_i(t)$ 为在时间 t 地块 i 上的虫口数，所以 $\sum_i n_i(t) = N$。因此，描述系统动力学的方程为：

$$\frac{dn_i(t)}{dt} = \sum_{j \neq i} e_{ij} n_j(t) - \sum_{j \neq i} e_{ij} n_i(t)$$

$$\frac{dX_i(t)}{dt} = \beta Y_i(t)[n_i(t) - X_i(t)] - \gamma X_i(t) + \sum_{j \neq i} e_{ij} X_j(t) - \sum_{j \neq i} e_{ij} X_i(t)$$

$$\frac{dY_i(t)}{dt} = \beta X_i(t)\left[\frac{M}{a} - Y_i(t)\right] - \mu Y_i(t)$$

式中，$i, j = 1, \cdots, a$。

(3) 访问模型：

假设某一时间(它是时间单位的一部分 T_{ij})，地块 i 的个体访问地块 j，访问之后，个体返回它们的出发地。假设人是平均分布的，描述系统动力学的方程为：

$$\frac{dX_i(t)}{dt} = \beta Y_i(t)\left[\frac{N}{a} - X_i(t)\right] - \gamma X_i(t) + \sum_{j \neq i} \beta T_{ij}\left[\frac{N}{a} - X_i(t)\right] Y_j(t)$$

$$\frac{dY_i(t)}{dt} = \beta\left(X_i(t) + \sum_{j \neq i} X_j(t) T_{ji}\right)\left[\frac{M}{a} - Y_i(t)\right] - \mu Y_i(t)$$

迁飞行为的参数化模式

翟保平，张孝羲：昆虫迁飞行为的参数化Ⅱ．模式与检验 生态学报，1997，17(2)

一维 TKE 模式：

$$\frac{\partial u}{\partial t} = f(v - v_g) - \frac{\partial}{\partial z}\left(K_m \frac{\partial u}{\partial z}\right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = f(u - u_g) - \frac{\partial}{\partial z}\left(K_m \frac{\partial u}{\partial z}\right)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z}\left(K_\theta \frac{\partial \theta}{\partial z}\right)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = K_m\left[\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2\right] - K_\theta \frac{g}{\theta_0}\frac{\partial \theta}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_m \frac{\partial E}{\partial z}\right) - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = C_1 \frac{\varepsilon}{E}\left\{K_m\left[\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2\right] - (1 - C_2) K_\theta \frac{g}{\theta_0}\frac{\partial \theta}{\partial z}\right\} - C_3 \frac{\varepsilon^2}{E} + C_4 \frac{\partial}{\partial z}\left(K_m \frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right)$$

式中，u，v 分别为风矢量的纬向分量和经向分量；u_g、v_g 为地转风矢量；θ 为位温；z 为距地高度；K_m、K_θ 分别为动量和热量湍流交换系数；g 为重力加速度；θ_0 为基准高度温度；E 为局地湍流动能；ε 为湍流能量耗散率；C_1~C_4 为常数。

蚊幼对狼蛛的营养作用模型

吴进才，徐建祥，程遐年：蚊幼对狼蛛的营养作用研究 生态学报，1997，17(3)

(1) 狼蛛对蚊幼和褐飞虱共存时的选择捕食：

对 i 种猎物的选择参数模型：

$$C_i = \frac{N_{ai}/N_{aT}}{N_i/N_T}$$

式中，$C_i > 1$ 说明捕食者选择 i 种猎物；$C_i < 1$ 说明捕食者选择的是另一种猎物；$C_i = 1$ 说明对两种猎物喜好程度一致。

(2) 拟水狼蛛对蚊幼捕食的功能反应：

Holling Ⅱ 型功能反应模型：

$$N_a = \frac{0.6046 T_t N_o}{1 + 0.0427 N_o}$$

间作系统中不同种群的共生利益和相互作用模型

Huang W：模拟 *Taxodium ascenden* 间作系统中不同种群的共生利益和相互作用 Ecological Modelling，1998，107

(1) 共生利益模型：

1) 竞争损失 C 可定义为：

$$C = W^{m} - W^{a}$$

式中，W^{a} 是复种中树木(或可耕农作物)的增长，W^{m} 是单作中树木(或可耕农作物)的增长

2) 树木下面资源共享的产量 S_{tr} 可定义为：

$$S_{tr} = W_{total} - W_{tr}^{a}$$

式中，W_{total} 是以前森林中的总产量；W_{tr}^{a} 是农业森林中树木的增长

3) *Taxodium ascendens* 间作系统中全部的相互作用：

$$I_{tr} = F_{tr} - C_{tr}$$

式中，I_{tr} 是农作物对树木的全部相互作用；F_{tr} 是肥料的作用，也就是由于土壤肥力的改进引起树木的产量增加；C_{tr} 是竞争影响，也就是由于与间作作物竞争光、水和营养引起树木的产量下降

4) *Taxodium ascendens* 间作系统中种群动力学的理论框架表示为：

$$\frac{dW_i}{dt} = M(W_i, t) - C(W_1, \cdots, W_n, t) + F(W_1, \cdots, W_n, t)$$

式中，W_i 物种 i 的生物量；t 是时间变量，F 是促进收益，M 是一个物种当与其他被管理的物种没有相互作用时的增长

5) *Taxodium ascendens* 间作系统中生产动力学的理论框架表示为：

$$A(W,t) = M(W,t) - C(W,t) + F(W,t) + S(W,t)$$

式中，$A(W,t)$ 是农业森林的生物量生产，S 是资源共享时的生产，在农业森林系统中它在有效利用环境资源方面有相当大的优点

(2) 相互作用模型：

对于一个三种植物的群落，有：

$$\frac{dW_i}{W_i dt} = r_{i0}\left[1 - \left(\frac{W_i}{K_i}\right)^{\theta_i} - \sum_{j \neq i} \alpha_{ij}\left(\frac{W_j}{K_i}\right)^{\psi_i} - \alpha'_{ij}\left(\frac{\prod_{j \neq i} W_j}{K_i}\right)^{\psi'_i}\right] + \beta_{ij}\left(\sum_j W_j\right)^{\lambda_i}$$

式中，W_i 是物种 i 的大小或密度；W_j 是物种 j 的大小或密度；θ_i 指单物种 i 种内竞争的反馈率；K_i 是物种 i 的承载力；α_{ij} 是物种 j 对 i 的竞争系数；ψ_i 指物种 i 种内竞争的反馈率；α'_{ij} 是联合影响系数，ψ'_i 是联合影响的反馈率，β_{ij} 指促进系数；λ_i 是促进作用的反馈率

野生种群的能量储存指数(E_{RI})

Bommarco R：食肉步行虫相对于生态系统复杂性的繁殖与能量储存 Ecological Applications, 1998, 8(3)

$$E_{RI} = 5.91 + 0.0640G\ (mg) - 1.24Lwingsheath\ (mm)$$

式中，G 为体重；Lwingsheath 为翅鞘长度 此模型可用来间接测量喂食速度

物种丰度的折叠刀估算与本地物种灭绝概率

Nichols J D, Boulinier T, Hines J E et al：估算动物社会中本地物种灭绝、殖民和颠覆速度 Ecological Applications, 1998, 8(4)

(1) 物种丰度的折叠刀估算的一般形式：

$$\hat{N}_k = R + \sum_{h=1}^{K} \alpha_{hk} f_h$$

式中，$\hat{N}_k$ 是物种丰度；R 是被观测物种的数量；α_{hk} 对于序列 k 的折叠刀估算是常数；f_h 是样方 $h = 1, \cdots, K$ 上被监测物种的数量，K 是样方的总数

(2) 丰度的变化率：

两个取样时期 i 和 j 之间的物种丰度变化率可以被估算为：

$$\hat{\lambda}_{ij} = \frac{\hat{N}_j}{\hat{N}_i}$$

式中，N_i 表示在时间点 i 时的物种丰度，且一般情况下 $i < j$。

(3) 本地物种灭绝概率：

$$1 - \hat{\phi}_{ij} = 1 - \frac{\hat{M}_j^{R_i}}{R_i}$$

式中，ϕ_{ij} 是灭绝概率的余角，表示样方 i 中的物种同时存在于样方 j 中的概率；R_i 是时期 i 中观测到的物种数量；$\hat{M}_j^{R_i}$ 是时期 j 中，对仍然存在的物种的数量的估计

叶片被采食率 lg 模型

唐建维，张建侯等：西双版纳热带次生林生物量的初步研究．植物生态学报，1998，22(6)

$$lg = 1 - \frac{n_1 w_1 + n_2 w_2}{w_1 \times N}$$

式中，n_1 为非虫食叶片数；n_2 为虫食叶片数；N 为全部叶片数；w_1 为非虫食叶片重量；w_2 为虫食叶片重量。

鼠类与天敌的捕食-食饵模型

成定平，屈国胜：自然生态条件下鼠类数量与天敌数量的平衡关系．生态学杂志，1999，18(2)

(1) 鼠类与天敌之间的捕食-食饵模型：

$$n_{t+1} = e^r n_t - \frac{pR}{w}\mu N_t - \frac{pR}{w}\mu b\left(e^r n_t - \frac{pR}{w}\mu N_t\right)$$

$$N_{t+1} = \mu N_t + \mu b\left(e^r n_t - \frac{pR}{w}\mu N_t\right)$$

式中，t 表示第 t 年；n 为某地鼠类数量；r 为瞬时增长率；w 为个体平均体重；N 为天敌数量；μ 为周限增长率；p 为个体年均食量；R 为食物中鼠的比例。

(2) 平衡关系模型：

$$N^* = \frac{(e^r - 1)w}{pR} n^*$$

$$r = \ln \frac{w - \mu(w - pR\mu b)}{(1-\mu)(w - pR\mu b)}$$

式中，n^* 为鼠类数量；N^* 为天敌数量；r 为鼠的瞬时增长率；其他同上。

浮游动物对浮游植物牧食力模型

赵文，刘国才：海水养虾池浮游动物对浮游植物牧食力的研究．生态学报，1999，19(2)

(1) 浮游动物对浮游植物的滤水率 F 模型：

$$F = \frac{Vf}{N} = \frac{V}{N}\left(\frac{\ln C_0 - \ln C_{tf}}{t} + K\right)$$

(2) 浮游动物对浮游植物的滤食率 G 模型：

$$G = AF\frac{C_{tf} - C_0}{(k-f)t}$$

(3) 浮游动物对某种浮游植物的选食率 S_r 模型：

$$S_r = \frac{C_0 - C_{tf}}{C_0} \times 100\%$$

式中，C_0 为试验开始时水样中浮游植物的密度；C_{tf} 为 t 时刻试验组中浮游植物的密度；V 为牧食试验水样体积；N 为 1L 水样中浮游动物总数；t 为试验时间；f 为摄食系数；K 为浮游植物增殖系数；A 为换算系数。

线虫无脊椎宿主系统模型

Fenton A, Norman R, Fairbairn J P et al：模拟食虫寄生虫的线虫对温室作物的无脊椎害虫的生活习性的影响．The Journal of Applied Ecology, 2000, 37

(1) 假定宿主种群受环境控制，保持一个恒定的承载力 K：

$$\frac{dX}{dt} = r\left(1 - \frac{X}{K}\right)X - \beta LX$$

$$\frac{dY}{dt} = \beta LX - \alpha Y$$

$$\frac{dL}{dt} = \Lambda\alpha Y - \beta LX - \mu L$$

式中，X 是易感染的宿主群体；Y 是被感染的尸体群体；L 是自由活动的具有传染性的线虫幼虫群体；r 是宿主群体的固有增长率；α 是尸体的损失率；β 是线虫的传染率；Λ 是每个宿主产生的线虫的总数；μ 是线虫的死亡率。

(2) 平衡值为：

$$X^* = \frac{\mu}{\beta(\Lambda - 1)}$$

$$Y^* = \frac{r\mu}{\alpha\beta(\Lambda - 1)}\left[1 - \frac{\mu}{\beta K(\Lambda - 1)}\right]$$

$$L^* = \frac{r}{\beta}\left[1 - \frac{\mu}{\beta K(\Lambda - 1)}\right]$$

因为这个系统与正均衡是生物学相关的，所以式中要求：$\beta K\Lambda > \mu + \beta K$。

植林地深度与鸟密度模型

Mancke R G, Gavin T A：植林地中繁殖鸟的密度：深度与边缘区建筑物的影响．Ecological Applications, 2000, 10(2)

(1) 植林地中的深度用 D 表示，则对植林地中的一个地块来说，有下式：

$$1/D^2 = 1/d_1^2 + 1/d_2^2 + 1/d_3^2 + 1/d_4^2 = \sum(1/d_i^2)$$

式中，d_i 是指地块对植林地每个边缘的距离。

(2) 植林地中鸟的密度：

假定靠近植林地所有边缘的一个种群的密度 A 是

一个常数；最边缘的密度，即所有植林地中密度深 B 也是一个常数；内部深度密度，即在所有植林地中在某一深度条件下从 A 到 B 平滑移动时的密度为 T，则具有这些特征的过渡深度的函数为：

$$p' = A[1-\exp(-T^2/D^2)] + B[\exp(-T^2/D^2)]$$

步行甲虫种群的补充模型

John Kotze D, Niemelä J, Nieminen M：波罗的海岛屿上步行甲虫的迁移成功　Journal of Biogeography, 2000, 27

$$C_{jk} = 100\frac{\sum_{i=1}^{Sjk}\left|X_{ij} - X_{ik}\right|}{\sum_{i=1}^{Sjk}\max(X_{ij}, X_{ik})}$$

式中，X_{ij}和 X_{ik}是第 i 物种在栖息地类型 j 和 k 处的存在和缺乏值

个体散布指数 I

戴友芝，唐受印，张建波：洞庭湖底栖动物种类分布及水质生物学评价　生态学报，2000，20(2)

$$I = N\sum_{i=1}^{N}\frac{n_i(n_i-1)}{x(x-1)}$$

式中，N 为样品数；x 为总个体数；n_i 为第 i 个样品中的个体数。

食物生态位宽度与重叠度模型

杜植华，计翔：浙江丽水中国石龙子的食性、两性异性和雌性繁殖　生态学报，2000，20(2)

（1）食物生态位宽度 B 模型：

$$B = \frac{1}{\sum p_i^2}$$

式中，p_i 为实际利用的第 i 种食物在所有被利用的食物种所占的比例。

（2）食物生态位重叠度 O_{jk} 模型：

$$O_{jk} = \frac{\sum p_{ij}p_{ik}}{\left(\sum p^2{}_{ij}\sum p^2{}_{ik}\right)^{1/2}}$$

式中，p_{ij}，p_{ik} 分别为被 j 和 k 种类或性别组动物利用的第 i 种食物在所有被利用的食物中所占的比例。

交配系统的进化模型

张大勇，姜新华：植物交配系统的进化、资源分配对策与遗传多样性　植物生态学报，2001，25(2)

（1）突变基因型个体向下一代贡献的基因数模型：

$$w = 1 + \sigma_m + \frac{(1-\sigma)(1-\delta_m)}{1-\delta}$$

（2）突变型个体的自交率模型：

$$\sigma_m = \frac{\delta_m\varepsilon}{\delta_m\varepsilon + (1-\delta)\omega}$$

$$\omega = n\pi$$

式中，σ，σ_m 分别为种群内野生型和突变型个体自交胚珠的比例；δ，δ_m 分别为两类个体生产的花粉落在自身花柱上的比例；ε 为相对竞争能力。

生态位分析模型

姚卫建：红鳍原鲌鳃部寄生单殖吸虫生态位分析　生态学杂志，2001，20(4)

（1）丰盛度 A 模型：

$$A = \frac{M}{N}$$

式中，M 为样本中寄生虫总数；N 为样本量

（2）生态位宽度 B 模型：

$$B = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n}P_i^2 n}$$

式中，n 为鳃片数目或鳃片分区的总数目；P_i 为第 i 区某种寄生虫在其总数中所占的比例。

（3）生态位重叠 PS_{ij} 模型：

$$PS_{ij} = 1 - \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n}\left|P_{ik} - P_{jk}\right|$$

式中，n 为鳃片数目或鳃片分区的总数目；P_{ik} 为第 k 区中第 i 种寄生虫在其总数中所占的比例；P_{jk} 为第 k 区中第 j 种寄生虫在其总数中所占的比例

生态足迹指标的计算与分析模型

张志强：中国西部 12 省(区市)的生态足迹　地理学报，2001，56(5)

（1）种消费项目的人均生态足迹分量的计算公式：

$$A_i = C_i/Y_i = (P_i + I_i - E_i)/(Y_i N)$$

式中，i 为消费项目的类型；Y_i 为生物生产土地生产第 i 种消费项目的年(世界)平均产量(kg·hm^{-2})；C_i 为第

i 种消费项目的人均消费量；A_i 为第 i 种消费项目折算的人均占有的生物生产面积(人均生态足迹分量)(hm²/人)；P_i 为第 i 种消费项目的年生产量；I_i 为第 i 种消费项目年进口量；E_i 为第 i 种消费项目年出口量；N 为人口数。

(2) 生态足迹的计算：

1) 人均生态足迹为：

$$f_e = \sum r_j A_i = \sum r_j (P_i + I_i - E_i) / (Y_i N)$$

$$(j = 1, 2, \cdots, 6)$$

式中，f_e 为人均生态足迹($hm^2 \cdot 人^{-1}$)；r_j 为均衡因子。

2) 区域总人口的生态足迹为：

$$F_e = N f_e$$

式中，F_e 为总人口的生态足迹($hm^2 \cdot 人^{-1}$)；N 为人口数。

(3) 生态承载力(生物承载力)的计算：

1) 人均生态承载力：

$$c_e = a_j r_j y_j \qquad (j = 1, 2, \cdots, 6)$$

式中，c_e 为人均生态承载力($hm^2 \cdot 人^{-1}$)；a_j 为人均生物生产面积；r_j 为均衡因子；y_j 为产量因子。

2) 区域生态承载力：

$$C_e = N c_e$$

式中：C_e 为区域总人口的生态承载力($hm^2 \cdot 人^{-1}$)；N 为人口数。

第二十三章 景观生态学

阴暗针叶林空间格局模型

罗耀华，陈庆诚，张鹏云：兴隆山阴暗针叶林空间格局及其利用光能的对策 生态学报,1984，4(1)

（1）草本种多样性 D 模型：

$$D = -\sum p_i \log_2 p_i$$

式中，p_i 表示第 i 种个体数在各个种个体总数中出现的概率。

（2）开敞度 K 模型：

$$K = \sum_{i=1}^{4}(\cot\alpha_i) = \sum_{i=1}^{4}(d/h)_i$$

式中，α_i 为样点到各象限植株距离与其高度形成的仰角；h 为各植株高度；d 为距离。

（3）种群密度分布对光的选择性指数模型：

$$G' = \frac{n}{X^2}\sum_i \left[x_i(x_i - 1)\right]$$

式中，x_i 表示在第 i 资源位(在此为样方中的个体数)；X 为全部 n 个资源位中个体总和。

（4）生态位重叠值 Ll 模型：

$$Ll = n\sum(px_i py_i)$$

式中，px_i 表示 x 种第 i 个资源位中所有个体全部测度范围内出现的概率；py_i 为种 y 的概率；n 同上。

侵蚀和沉积空间变化的随机区域模拟模型

Pickup G，Chewings V H：澳大利亚中部干旱地带平原冲积景观中，侵蚀和沉积空间变化的随机区域模拟. Ecological Modelling, 1986, 33

（1）随机区域模型：

$$Y(s) = \sum_{r\in N}\theta_r Y(s+r) + \sqrt{\rho\omega(s)}$$

式中，$Y(s)$是位置 s 的侵蚀指数值，指栅格坐标，其中 $\{s=(i,j)\in\Omega\}$；r 表示位置 s 周围相邻集合 N 中某一成员的坐标，其中 $\{r=(k,l)\in N\}$；θ_r 是权重参数；ρ 是噪音序列的变化；$\omega(s)$ 是带有零平均值和单位不同的随机变量序列。

（2）空间自相关函数 g 如下：

$$R(g) = \frac{n}{\sum_{(2)} W_i(g)} \sum_{(i,j)\in C(g)} W_{ij}(g) y_i y_j \Big/ \sum_{i=1}^{n} y_i^2$$

式中，$\sum_{(2)}$ 表示双倍的总和；$y = Y - \bar{Y}$；$W_{ij}(g) = \begin{cases} 1 & ((i,j)\in C(g)) \\ 0 & (其他) \end{cases}$ 是一个权重矩阵，$C(g)$ 是相邻集合。

斑块特征指标模型

肖笃宁，苏文贵，贺红士：景观生态学的发展和应用 生态学杂志，1988，7(6)

（1）斑块的形状指标 D_i 模型：

$$D_i = P/2\sqrt{A\pi}$$

式中，A 为斑块面积；P 为斑块直径。

（2）隔离性指标 r_i 模型：

$$r_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} d_{ij}$$

式中，n 为相邻斑块数；d_{ij} 为与相邻斑块间的距离。

（3）易接近性指标 a_i 模型：

$$a_i = \sum_{j=1}^{n} d_{ij}$$

（4）斑块相互作用指标 L_i 模型：

$$L_i = \sum_{j=1}^{n}\frac{A_j}{d_j^{\,2}}$$

式中，d 为斑块间的边缘距离。

景观生态空间格局动态度模型

赵景柱：景观生态空间格局动态度量指标体系．生态学报，1990，10(2)

（1）类斑匀度模型：

$$h_i(t) = \left\{\frac{1}{n_i}\sum_{j=1}^{n_i}\left[H_{ij}(t) - \bar{H}_i(t)\right]^2\right\}^{1/2}$$

$$(i = 1, 2\cdots, m)$$

（2）斑匀度模型：

$$H(t)=\left\{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n_i}\left[H_{ij}(t)-\bar{H}(t)\right]^2\right\}^{1/2}$$

(3) 类斑散度模型：

$$D_i(t)=\frac{1}{n_i S(t)}\left\{\left[x_{ij}(t)-\bar{x}_i(t)\right]^2+\left[y_{ij}(t)-\bar{y}_i(t)\right]^2\right\}^{1/2}$$

(4) 斑散度模型：

$$D(t)=\frac{1}{nS(t)}\left\{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n_i}\left[\left(x_{ij}(t)-\bar{x}(t)\right)^2+\left(y_{ij}(t)-\bar{y}(t)\right)^2\right]\right\}^{1/2}$$

(5) 斑块贴近度模型：

$$A_{i_0j_0}(t)=\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left\{\left[x_{ij}(t)-x_{i_0j_0}(t)\right]^2+\left[y_{ij}(t)-y_{i_0j_0}(t)\right]^2\right\}^{\frac{1}{2}}$$

(6) 类斑丰度模型：

$$B_i(t)=\left(1-\frac{1}{n_i}\right)\frac{1}{S(t)}\sum_{j=1}^{n_i}H_{ij}(t)$$

$$(i=1,2,\cdots,m)$$

(7) 斑丰度模型：

$$B(t)=\left(1-\frac{1}{n}\right)\frac{1}{S(t)}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n_i}H_{ij}(t)$$

(8) 丰度模型：

$$R(t)=\left(1-\frac{1}{k}\right)\frac{1}{S(t)}\sum_{i=1}^{k}A_i(t)$$

(9) 带斑比模型：

$$F(t)=R(t)/B(t)$$

(10) 边缘强度模型：

$$E_{ij\,pq}(t)=\left\{M\left[P_{ij}(t)\cap P_{pq}(t)\right]\right\}/H_{ij}(t)$$

式中，$M\left[P_{ij}(t)\cap P_{pq}(t)\right]$ 为斑块 P_{ij} 与 P_{pq} 相交部分的面积。

(11) 景观网络的连通度模型：

$$N_1(t)=\left\{L(t)-\left[G(t)-1\right]\right\}/\left\{3\left[V(t)-2\right]\right\}$$

式中，$V(t)$为顶点数；$L(t)$为连边数。

(12)景观网络的环圈度模型：

$$N_2(t)=\left[L(t)+G(t)-V(t)\right]/\left[2V(t)-5\right]$$

上述各式中，$S(t)$为景观的面积；$H_{ij}(t)$为斑块 $P_{ij}(t)$的面积；$A_i(t)$为廊带 $C_i(t)$的面积。

景观的空间模式差异与景观优势模型

Mladenoff D, White M A, Pastor J：比较无人干预的生长和被扰乱的森林景观的空间模式差异．Ecological Applications, 1993, 3(2)

(1) 景观差异 (H)：

$$H=-\sum_{k=1}^{m}P_k\lg P_k$$

式中，P_k 是在生态系统类型 k 中景观所占的比例；m 是景观类型的总数。

(2) 景观优势(d)：

$$d=H_{\max}+\sum_{k=1}^{m}P_k\lg P_k$$

(3) Jacobs 和 Jenkins 的选择指数：

$$E_{ij}=\ln[r_{ij}(1-p_{ij})/p_{ij}(1-r_{ij})]$$

式中，E_{ij} 是计算地块类型 i 和 j 的最临近概率的选择指数；r_{ij} 是地块类型 i 和 j 具有的公共边界的比例；p_{ij} 是地块类型 i 和除了 j 之外的所有其他地块类型具有的公共边界的比例。

气候变化对森林景观短时影响的仿真模型

Prentice I C, Skyes M T, Cramer W：气候变化对森林景观短时影响的仿真模型．Ecological Modelling, 1993, 65

(1) 模型说明：

白天土壤湿度 Ω_i 如下：

$$\Omega_i=\min\{[\Omega_{i-1}+(P_i-E_i)],\Omega_{\max}\}$$

式中，i 是以天为单位的时间；$E_i=\min\{S_i,D_i\}$ 是实际每天的土壤水分蒸发蒸腾损失总量 (AET)，S_i 是水分的供给函数，可表示为 $S=C_w(\Omega_{i-1}/\Omega_{\max})$，$C_w$ 是饱和土壤的最大水分蒸发蒸腾损失率。D_i 是水分需求函数，且 $D=3600[s/(s+\gamma)]R_n/L$，$R_n$ 是瞬时净辐射，s 是某一温度下饱和水汽压的增加速率，γ 是干湿计常数，L 是水分的蒸发潜热；$\Omega_{\max}$ 是土壤含水量；P_i 是每天降水量。

(2) 环境对森林过程的影响模型：

通过不同环境约束因子的组合可以模拟环境对森林的同化作用、生根作用和呼吸作用率的影响：

$$[m_G]=\delta_{tc}\ \delta_{gdd-}\Phi_T\Phi_D\Phi_C$$

$$[m_E]=\delta_{tc+}\delta_{tw-}[m_G]$$

$$[m_R]=\mu_T$$

式中，[m]是复合乘数；δ 是 Kroneckerβ 函数，只能取 0 或 1 中的一个值；Φ 和 μ_T 是取非负实数值的函数。

(3) 温度对净同化作用的有效性：

每日温度响应变量：

$$f(T)_i=4(T_i-T_{min})(T_{max}-T_i)/(T_{min}-T_{max})^2$$

式中，T_i 是每日温度；T_{max} 和 T_{min} 是 T_i 的最大和最小值。

每年净同化作用被一个因子缩小：

$$\Phi_T=\sum_i f(T)_i/365$$

式中，"和式"表示 $T_i>5$ 的那段时期的总和。

(4) 温度对边材呼吸作用的影响：

假定边材维持的呼吸作用随温度呈指数增加：

$$g(T)_i=Q_{10}^{(T_i-T_{ref})/10}$$

式中，T_{ref} 是一个参照温度，每年的边材呼吸作用通过一个因子来调整，即 $\mu(T)_i=\sum_i g(T)_i/365$。

(5) 干旱的影响：

总干旱压力指数被计算为：

$$d_n=1-\sum_i E_i/\sum_i D_i$$

每年的净同化作用被一个因子缩小：

$$\Phi_D=1-(\mathrm{dri}/\mathrm{dri}_{max})^2$$

(6) CO_2 的直接作用—净同化作用的现象模型 P：

$$P=P_{max}(I-c)/(I+\alpha-c)$$

式中，I 是被吸收的 PAR；c 是 PAR 补偿点；P_{max} 是光饱和净同化作用率；α是一个"半饱和点"，它等于 P_{max}/ϕ；φ 是光合作用的量子效率。

农业景观生产潜力模型

赵羿、吴彦明、邓百祥：沈阳市东陵区景观生态潜力研究．生态学杂志，1993，12(5)

(1) 光合潜力 Y_p 模型：

$$Y_p=\frac{666.7\times10^4\times15}{C\times10^3}FEQ(\mathrm{kg\cdot hm^{-2}})$$

式中，F 为光能利用率；E 为经济系数；Q 为太阳的总辐射值。

(2) 光温潜力 Y_T 模型：

$$Y_T=Y_pf(T)$$

式中，f(T)为温度对光合潜力的修正系数。

(3) 气候潜力 Y_C 模型：

$$Y_C=Y_Tf(w)$$

式中，f(w)为水分对光温产量的修正系数。

(4) 土地潜力 Y_L 模型：

$$Y_L=\frac{N_nVW_{ch}T_{ch}}{NR}\times10(\mathrm{kg\cdot hm^{-2}})$$

式中，N_n 为土壤中的代表养分；VW_{ch} 为耕层容重；T_{ch} 为耕层厚度；NR 为作物每 100kg 产量需要的养分量。

林网的景观指标及其布局的宏观度量模型

周新华，孙中伟：试论林网在景观中布局的宏观度量与评价．生态学报，1994，14(1)

(1) 林网合理带斑比 F_o 模型：

$$F_o=\frac{S_{bo}[1-1/(N_{bo}+1)]}{A[1-1/(n+1)]}$$

式中，S_{bo} 和 N_{bo} 分别为合理占地面积和合理主带与副带之和。

(2) 林网合理连接度 Q_o 模型：

$$Q_o=[N_{bo}-(n-1)]/L_{max}(V_{bo})$$

式中，$L_{max}(V_{bo})$为林网最多林带(连边)数，是林网节点数 V_{bo} 的函数。

(3) 林网合理环度 R_o 模型：

$$R_o=\begin{cases}(N_{bo}+n-V_{bo})/H_{max}(V_{bo}) & (V_{bo}>4)\\ 0 & (V_{bo}=2,3)\end{cases}$$

式中，$H_{max}(V_{bo})$为林网可能有的最大环路(闭合网络)数，是林网节点数 V_{bo} 的函数。

(4) 林网合理优势度模型：

$$D_o=\frac{(R_{do}+R_{fo})/2+R_{co}}{2}$$

式中，R_{ds}、R_{fo}和R_{co}分别为林网的合理相对多度、合理频度和合理盖度。

离差指数 R

Wallin D O, Swanson F J, Marks B：模式产生规则中景观模式对变化的响应：林学中的土地利用的遗留物．Ecological Applications, 1994,4(3)

$$R = 2p^{1/2}r$$

式中，p是平均地块密度（每单位面积地块的数目）；r是平均最临近距离。这个离差指数被广泛的用于生态研究，用来提供对象空间分布的量度。

景观空间格局特征模型

傅伯杰：黄土区农业景观空间格局分析　生态学报，1995，15(2)

(1) 分维数D模型：

$$P = kA^{D/2}$$

式中，P为斑块周长；A为斑块面积。

(2) 斑块伸长指数G模型：

$$G = \frac{P}{\sqrt{A}}$$

(3) 多样性指数H模型：

$$H = -\sum_{i=1}^{m} P_i \ln P_i$$

式中，P_i为景观类型i所占面积的比例；m为景观类型的数目

(4) 优势度D_0模型：

$$D_0 = H_{max} + \sum_{i=1}^{m} P_i \ln P_i$$

式中，H_{max}为最大多样性指数，H_{max}=ln m。

(5) 相对丰富度R模型：

$$R = \frac{M}{M_{max}} \times 100\%$$

式中，M为景观中现有的景观类型；M_{max}为最大可能的景观类型。

(6) 景观破碎度F模型：

$$F = [(N-1)/C] \times 100\%$$

式中，N为景观中斑块的总数；C为景观数据矩阵的方格网中栅格的总数。

景观结构分析模型

陈利顶，傅伯杰：黄河三角洲地区人类活动对景观结构的影响分析——以山东省东营市为例　生态学报，1996，16(4)

(1) 景观多样性指数H模型：

$$H = -\sum_{i=1}^{m} P_i \lg P_i$$

式中，P_i为景观类型i所占面积的比例；m为景观类型的数目

(2) 优势度D模型：

$$D = H_{max} - \sum_{i=1}^{m} P_i \lg P_i$$

式中，H_{max}=lg m，为最大多样性指数。

(3) 景观的破碎度C模型：

$$C = \frac{\sum n_i}{A}$$

式中，$\sum n_i$为景观中所有景观类型斑块的总个数；A为景观的总面积。

(4) 景观的分离度F_i模型：

$$F_i = \frac{D_i}{S_i}$$

$$D_i = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{n}{A}}$$

$$S_i = \frac{A_i}{A}$$

式中，F_i为景观类型i的分离度；D_i为景观类型i的距离指数；S_i为景观的面积指数；A为景观的总面积；A_i为景观类型i的总面积；n为景观类型i中的斑块总个数。

加权平均地块规模指数（W_{MPS}）

Li B, Archer S：加权平均地块规模——一个景观结构定量化的robust指数　Ecological Modelling, 1997, 102

$$W_{MPS} = \sum w_s s = \sum \frac{n_s s^2}{\sum n_s s}$$

式中，n_s是每个生境中大小为s的地块的数目；w_s是加权因子。

每种植被类型的 Lacunarity 指数

Wu Y, Sklar F H, Rutchey K：分析和模拟湿地中的分割模式．Ecological Applications, 1997, 7(1)

$$\Lambda(r)=\sum S^2Q(S,r)/\left[\sum SQ(S,r)\right]^2$$

式中，S 是在一个光滑窗口(r)中，一种已知植被类型的单元数目；$Q(S, r)$是已知植被类型在一个光滑窗口中出现的相应频率。

景观格局指数

王宪礼，肖笃宁，布仁仓等：辽河三角洲湿地的景观格局分析 生态学报，1997，17(3)

(1) 景观多样性指数 H 模型：

$$H=-\sum_{k=1}^{m}P_k\log_2 P_k$$

式中，P_k 为 k 种景观类型占总面积的比；m 为研究区中景观类型的总数。

(2) 优势度指数 D 模型：

$$D=H_{\max}+\sum_{k=1}^{m}P_k\log_2 P_k$$

$$H_{\max}=\log_2 m$$

式中，$H_{\max}$ 为研究区各类型景观所占比例相等时，景观拥有的最大的多样性指数。

(3) 均匀度指数模型：

$$E=\frac{H}{H_{\max}}\times 100\%$$

$$H=-\lg\sum_{k=1}^{m}(P_k)^2$$

$$H_{\max}=\lg m$$

式中，E 为均匀度指数；H 为修正了的 Simpson 指数；$H_{\max}$ 为在给定丰富度 T 条件下景观最大可能均匀度。

(4) 景观破碎化指数模型：

$$FN_1=\frac{N_p-1}{N_c}$$

$$FN_2=\frac{S_{mp}(N_f-1)}{N_c}$$

式中，FN_1 和 FN_2 为两个某一景观类型斑块数破碎化指数；N_p 为景观里各数斑块的总数；N_c 为景观数据矩阵的方格网中格子总数；N_f 为景观中某一景观类型的总数；S_{mp} 为景观里各数斑块的平均斑块面积。

(5) 斑块的分维数模型：

$$Q(L)=LD$$

式中，$Q(L)$为在观测尺度 L 上获得的某种量；D 为量 Q 的分维数。

(6) 聚集度指数模型：

$$C_r=1-\frac{C}{C_{\max}}$$

$$C=-\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}P(i,j)\lg\left[P(i,j)\right]$$

$$C_{\max}=m\lg m$$

式中，C_r 为相对聚集度指数；C 为复杂性指数；$C_{\max}$ 为 C 的最大可能值；$P(i,j)$为生态系统 i 与生态系统 j 相邻的概率。

异质性的产生机制和景观异质性指数

肖笃宁，布仁仓，李秀珍：生态空间理论与景观异质性，生态学报，1997，17(5)

(1) 多样性指数模型：

$$R=\frac{T}{T_{\max}}\times 100\%$$

$$E=\frac{H}{H_{\max}}\times 100\%$$

$$R_d=100-\frac{D}{D_{\max}}\times 100\%$$

式中，R 为丰富度；E 为均匀度；R_d 为优势度。

(2) 镶嵌度指数模型：

$$P_T=\frac{1}{N_b}\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}E_{Eij}D_{Dij}$$

$$R_c=1-\frac{C}{C_{\max}}$$

$$C=\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}P_{ij}\lg P_{ij}$$

$$C_{\max}=2\lg T$$

式中，P_T 为镶嵌度；N_b 为边界总长；E_E 为共同边界；D_D 为两组分间的相异度；R_c 为聚集度。

(3) 距离指数模型：

$$N_n=\frac{M_{nnd}}{E_{nnd}}$$

式中，N_n 为最小相邻指数；M_{nnd} 为同类最近斑块间的平均距离；E_{nnd} 为随机分布时的期望值。

景观动态模型

岳天祥，程彤，张红旗等：景观动态及其驱动因素和效应分析——以江西省泰和县灌溪乡千烟洲为例．自然资源，1997，6

DLU 战略模型：

$$\mathrm{DLU}(R,t)=\frac{D_{\text{spatial}}(R,t)}{\sqrt{2\cdot\left\{1+\left[D_{\text{spatial}}(R,t)\right]^{2}\right\}}}+\frac{D_{\text{size}}(R,t)}{\sqrt{2\left\{1+\left[D_{\text{size}}(R,t)\right]^{2}\right\}}}$$

式中，$D_{\text{spatial}}(R,t)$为空间多样性指数；$D_{\text{size}}(R,t)$为田块规模指数；DLU(R,t)为 DLU 战略指数。

景观空间格局的测定模型

常学礼，邬建国：科尔沁沙地景观格局特征分析．生态学报，1998，18(3)

（1）分维数模型：

$$P=kA^{D/2}$$

$$D=2\ln(P/4)/\ln A$$

式中，D 为分维数；P 为斑块周长；A 为斑块面积。

（2）修改分维数模型：

$$D_{\mathrm{m}}=2\ln(P_{\mathrm{m}}/4)/\ln A$$

$$P_{\mathrm{m}}=P+2(A-1)C/(C_t-1)$$

式中，D_{m} 为修改分维数；P_{m} 为修改周长；C 为相邻斑块数；C_t 为景观种所有斑块类型数。

（3）景观多样性指数 H 模型：

$$H=-\sum_{i=1}^{m}P_i\ln P_i$$

式中，P_i 为斑块类型 i 所占景观面积的比例；m 为斑块类型数目

有河岸缓冲区的景观中废水排放的启发式模型

Weller D E, Jordan T E, Correll D L：有河岸缓冲区的景观中废水排放的启发式模型．Ecological Applications, 1998, 8(4)

（1）缓冲区内物质的保持力：

假设有一个景观含两个生态系统：一个是处于上坡面的排放废水的生态系统，另一个是处于下坡面的、可在污水到达小溪以前能够吸入这些污水的河岸缓冲区。我们可用一个沿小溪分组的一个栅格单元来构建这个空间模型，它通过每个栅格单元释放其接收物质的一个固定部分 t 来模拟这些污染物质在缓冲区内的保持力。

从一列宽度为 w 的缓冲单元中释放的物质 d_w 为：

$$d_{\mathrm{w}}=it^{w}=ie^{w\ln t}$$

式中，i 是输入量。

（2）该景观中的最终输出为：

$$D=s(w_{\max}-w)t^{w}$$

式中，s 是每个上坡面生态系统单元释放的物质，$w_{\max}$ 是没有河岸缓冲带的源区的宽度。

（3）缓冲保持力：

$$\text{缓冲保持力}=\frac{s(w_{\max}-w)-s(w_{\max}-w)t^{w}}{sw_{\max}}$$

景观空间分析指标

刘惠清，龙花楼：为生态建设服务的吉林省西部景观类型研究．地理研究，1998，17(4)

（1）类型重要值：

$$I=S_{\mathrm{L}}/S_{\mathrm{Q}}$$

式中，I 为类型重要值；S_{L} 为区中某一类型面积；S_{Q} 为小区总面积。

（2）嵌块体密度：

$$D=N/S_{\mathrm{Q}}$$

式中，D 为小区内嵌块体密度；N 为区内各嵌块体的总数。

（3）平均内缘比率：

$$K=\frac{\sum_{i=1}^{n}A_i/P_i}{n}$$

式中，K 为平均内缘比率；n 为某稳定类型的嵌块体个数；A_i 为第 i 个嵌块体的面积；P_i 为第 i 个嵌块体的周长；A_i/P_i 为第 i 个嵌块体的内缘比。

景观结构的影响模型

Hokit D G, Stith B M, Branch L C：佛罗里达丛林地区景观结构的影响：一种种群观点．Ecological Applications, 1999, 9(1)

（1）地块隔离：

每一地块的隔离被定义为：

$$S_i=\sum P_j\exp(-d_{ij})A_j$$

式中，求的是所有地块的总和$(j\neq i)$；P_j 被丛林蜥蜴

占据的为 1，未被从林蜥蜴占据的为 0；d_{ij} 是经过矩阵渗透加权的地块 i 和地块 j 之间的距离；A_j 是地块 j 的面积。

(2) 预测被蜥蜴占据的地块的模型是：

$$P_i = \exp(0.61A_i + 0.05S_i - 5.22)/[1 + \exp(0.61A_i + 0.05S_i - 5.22)]$$

式中，P_i 是地块 i 被占据的概率；A_i 是地块 i 中翻沙柄息地的面积；S_i 是地块 i 的隔离参数。

景观格局指数

周华峰，马克明，傅伯杰：人类活动对北京东灵山地区景观格局影响分析　自然资源学报，1999，14(2)

(1) 景观多样性指数：

$$H = -\sum_{i=1}^{m} P_i \ln P_i$$

式中，H 为多样性指数；Pi 是景观类型 i 所占面积的比例；m 为景观类型数目。H 值越大，表示景观多样性越大。

(2) 优势度：

$$D = H_{max} + \sum_{i=1}^{m} P_i \ln P_i$$

$$H_{max} = \ln m$$

式中，D 为景观的优势度，它与多样性指数成反比，对于景观类型数目相同的不同景观，多样性指数越大，其优势度越小。

(3) 均匀度：

$$E = (H/H_{max}) \times 100\%$$

均匀度和优势度一样，也是描述景观由少数几个主要景观类型控制的程度。这两个指数可以彼此验证。

(4) 分维数：

$$D = 2\ln(P/4)/\ln A$$

式中，D 表示分维数；P 为斑块周长；A 为斑块面积。D 值越大表明板块形状越复杂，D 值的理论范围为 1.0~2.0，1.0 代表形状最简单的正方形斑块，2.0 代表等面积下周边最复杂的斑块。

(5) 聚集度指数：

$$RC = 1 - C/C_{max}$$

式中，RC 是相对聚集度指数，取值范围为 0~1 之间，RC 的取值越大，则代表景观由少数团聚的大斑块组成，RC 的值越小，则代表景观由许多小斑块组成；C 为复杂性指数，C_{max} 是 C 的最大可能取值，C 和 C_{max} 的计算公式为：

$$C = -\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} P(i,j)\ln[P(i,j)]$$

$$C_{max} = m\ln m$$

式中，$P(i,j)$ 是生态系统 i 与生态系统 j 相邻的概率，m 为景观中生态系统类型总数。在实际计算中，$P(i,j)$ 可由下式估计：$P(i,j) = E(i,j)/Nb$，$E(i,j)$ 是相邻生态系统 i 与 j 之间的共同边界长度，Nb 是景观中不同生态系统间边界的总长度。

缀块景观的种群动态模型

Fagan W：初始条件对复合种群存续时间的微弱影响．Ecological Applications, 1999, 9(4)

$$N_i^{t+\Delta t} = N_i^t + I_i^t - E_i^t$$

$$N_i^{t+1} = (N_i^{t+\Delta t} - C_i^t)\exp\left[\rho\left(1 - \frac{N_i^{t+\Delta t}}{K_i} - C_i^t\right)\right]$$

式中，N_i^t 是指在时间 t 时第 i 个缀块种群个体数；I_i^t 和 E_i^t 分别表示第 i 个种群的迁入和迁出数；C_i^t 代表由于外部因素引起的种群数量的减少；ρ 指种群增长的速度；K_i 是每个缀块的承载能力。

在年 t 内第 i 个缀块的净迁入量是：

$$I_i^t = \frac{\beta}{m}\sum_{i=1}^{m} E_i^t = \frac{\beta\delta}{m}\sum_{i=1}^{m} N_i^t$$

式中，β 是指个体成功迁入的概率，δ 是扩散速度。

模拟景观功能及其效应的网络法

Leibowitz S G, Loehle C, Li B et al：网络法模拟景观功能及其效应．Ecological Modelling, 2000, 132

(1) 景观功能变化模型：

$$\frac{dS(j)}{dt} = Z(j) + \sum_{i=1}^{r} \alpha(i,j)S(i) - \sum_{k=1}^{m} \alpha(j,k)S(j) - R(j)S(j) + P(j)$$

式中，$S(j)$ 为第 j 个格点的景观功能；$Z(j)$ 为外部恒定输入；$\alpha(i,j)$ 为 i 到 j 的转移矩阵；$R(j)$ 为减少速率，如蒸发，收获等因素导致的减少；$P(j)$ 为生产速率，取定值。

(2) 稳态解：

$$S(j)=\frac{Z(j)+\sum_{i=1}^{n}\alpha(i,j)S(i)+P(j)}{\sum_{k=1}^{m}\alpha(j,k)+R(j)}$$

对三层网络：

第一层格点的稳态解为：

$$S_1(i)=\frac{Z_1(i)+P_1(i)}{\sum_j \alpha(i,j)+R(i)}$$

$$(i=i_1,\cdots,i_m;\quad j=j_1,\cdots,j_n)$$

第二层格点的稳态解为：

$$S_2(j)=\frac{Z_2(j)+\sum_i \alpha(i,j)S_1(i)+P_2(j)}{\sum_k \alpha(j,k)+R_2(j)}$$

$$(i=i_1,\cdots,i_m;\quad j=j_1,\cdots,j_m;\quad k=k_1,\cdots,k_m)$$

亨特山景观特征对沉积作用模型

Weathers K C, Lovett G M, Likens G E et al: 纽约卡特斯克尔山脉的亨特山景观特征对沉积作用的影响. Ecological Applications, 2000,10(2)

(1) 亨特山高海拔地区(>1000m)空气沉积的面积加权模型：

$$D_x=D_bE_xA_x$$

式中，D_x是景观特征 x 的增强沉积物；D_b是基本沉积物；E_x是景观特征 x 的增强系数；A_x是景观特征 x 的面积。

(2) 面积加权的平均增强沉积物可用下式计算：

$$\text{面积加权平均}\ D_A=(\sum D_x)/(\sum A_x)$$

式中，$\sum D_x$ 是所有景观特征的增强沉积物的总量，$\sum A_x$ 是指高程大于 1000 m 的地区的总面积。

面积加权的覆被指数

Coppedge B R, Engle D M, Masters R E et al: 鸟类对南方大平原破碎草场景观变化的反应. Ecological Applications, 2001, 11(1)

四种植被类型中每类的面积加权覆被指数可用下式从各自景观中得到：

$$\sum_{i-1-j}^{j}P_iC_{ik}$$

式中，P_i 是指由多边形 i 组成的景观区面积的相对比例；C_{ik} 是指在多边形 i 内植被类型 k 的优势等级的中值(百分比)。

动态景观中的食草模型

Johnt K, Brandl R, Pfeifer R: 在一个缀块的动态景观中的食草：人类土地利用与白鹳. Ecological Applications, 2001, 11(1)

(1) 食料的可用性：

食料的可用性可用割草后第 t 天食草时能量的可能摄入率 $e(t)$来表示：

$$e(t)=q(t)e_{\max}$$

式中，最大能量摄入率 $e_{\max}$ 表示在一个刚收割的牧场上每单位时间的能量消耗；参数 $q(t)$ 是一个用以反映牧草收割后由于杂草的生长引起的草料场质量的下降。

(2) 鹳食草的时间：

$$\tau(d)=2de_f/e(t)$$

式中，鹳食草的时间 τ 表示鹳呆在缀块期间能量摄入的持续时间；d 表示距离；e_f 是鹳飞行消耗的能量。

景观斑块密度和边缘密度模型

张芸香，郭晋平：森林景观斑块密度及边缘密度动态研究——以关帝山林区为例．生态学杂志，2001，20(1)

(1) 斑块密度模型：

$$D_P=\frac{1}{A}\sum_{i=1}^{M}N_i$$

$$D_{pi}=\frac{N_i}{A_i}$$

$$A=\sum_{i=1}^{M}A_i$$

式中，D_P 为景观斑块密度；D_{pi} 为景观要素斑块密度；A 为研究范围景观总面积；M 为景观要素类型总数；N_i 为第 i 类景观要素的斑块数；A_i 为第 i 类景观要素的总面积。

(2) 边缘密度模型：

$$D_e=\frac{1}{A}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{M}P_{ij}$$

$$D_{ei}=\frac{1}{A}\sum_{j=1}^{M}P_{ij}$$

$$(i\neq j)$$

式中，D_e 为景观总体边缘密度；D_{ei} 为景观要素边缘

密度；P_{ij}中第 i 类景观要素斑块与第 j 类景观要素斑块间的边界长度。

景观特征指数

肖寒，欧阳志云，赵景柱等：海南岛景观空间结构分析。生态学报，2001，21(1)

(1) 景观优势度指数模型：

$$P_i=\left(\sum_{i=1}^{n}a_{ij}/A\right)\times 100$$

式中，P_i为景观类型 i 所占景观比例；a_{ij}为斑块 ij 的面积；A 为景观总面积。

(2) 斑块密度 D_p 模型：

$$D_p=\frac{N}{A}\times 10\ 000\times 100$$

式中，N 为景观中斑块数量；A 为景观面积。

(3) 边缘密度 D_e 模型：

$$D_e=\frac{E}{A}\times 1\ 000$$

式中，E 为景观中边缘长度。

(4) 分维数模型：

$$M_{PFD}=\frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left(2\ln\frac{0.25P_{ij}}{\ln a_{ij}}\right)}{N}$$

式中，M_{PFD}为平均斑块分维数；P_{ij}为斑块 ij 的周长；a_{ij}为斑块 ij 的面积；N 为景观中斑块数量；m 为景观类型数目；n 为某类景观类型的斑块数量。

(5) 景观多样性指数 H 模型：

$$H=-\sum_{i=1}^{m}P_i\ln P_i$$

式中，P_i为景观类型 i 所占面积的比例；m 为景观类型数目。

(6) 平均接近指数 I_{mp} 模型：

$$I_{mp}=\frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\sum_{s=1}^{n}\frac{a_{ijs}}{h_{ijs}}}{N}$$

式中，a_{ijs}为离斑块 ij 指定距离内的同类斑块 ijs 的面积；h_{ijs} 为离斑块 ij 指定距离内的同类斑块 ijs 与斑块 ij 的距离；N 为景观中的斑块数量。

农地景观格局变化指标体系

付永能，陈爱国，郭辉军等：西双版纳大寺老寨农地景观格局变化。生态学杂志，2001，20(4)

(1) 景观组分比例 P_i 模型：

$$P_i=\frac{A_i}{A}\times 100\%$$

式中，A_i为景观组分 i 的面积；A 为景观的总面积。

(2) 景观组分破碎度 R_i 模型：

$$R_i=\frac{N_i}{A}$$

式中，N_i 为景观组分 i 的斑块数。

(3) 景观组分的平均大小 $\overline{A}$ 模型：

$$\overline{A}=\frac{A_i}{N_i}\quad 或\quad \overline{A}=\frac{A}{N_i}$$

第二十四章 全球变化

年轮指数及其与气候因子的相关性模型

卓正大：从祁连山圆柏年轮的测定推论该地区气候和冰川变化的趋势。植物生态学与地植物学丛刊.1981，5(1)

(1) 树木年轮的读数和生长量的订正——年轮指数 I_t 模型：

$$I_t = \frac{Y_t / Y_t'}{\left(\sum_{t=1}^{N} Y_t / Y_t'\right) \Big/ N}$$

式中，Y_t 为实际年轮宽度；Y_t' 为生长量；N 为年轮总数；t 为年轮的年序。

(2) 年轮指数与气候因子的相关系数 r 模型：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(X_i - \bar{X}\right)\left(Y_i - \bar{Y}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(X_i - \bar{X}\right)^2 \sum_{i=1}^{N}\left(Y_i - \bar{Y}\right)^2}}$$

式中，X 为气候某要素资料；Y 为树木年轮指数；N 为树木年轮总数。

空气传输部分的渐近线分析模型

Mulholland R J, Read J S, Emanuel W R：用来验证全球碳模型的空气传输部分的渐近线分析. Ecological Modelling, 1987, 36

(1) 空气传输部分：

一段特定时期中，大气层中 CO_2 含量与输入大气的 CO_2 的变化比例可以定义为空气传输部分(AF)。

$$AF(t_1, t_2) = \frac{C_A(t_2) - C_A(t_1)}{\int_{t_1}^{t_2} F_F(s)\mathrm{d}s}$$

式中，$C_A(t)$是在时间 t 平均每年大气 CO_2 浓度；$F_F(t)$是估计的每年由于化石燃料燃烧产生的 CO_2 的输入比例。

(2) 1959 到 1980 年，$C_A(t)$和 $F_F(t)$线性相关：

$$C_A = aF_F + b$$

式中，a=15.58；b=634.01。

全球土地利用变化及规划模型

Esser G：1860－1980 年全球土地利用变化和 2500 年未来规划. Ecological Modelling, 1989, 44

(1) 土地利用面积的回归模型：

$$A_a(i,m) = A_a(1970,m) R_{kor}(i,m)$$

在栅格要素层上，"相对农业面积"，$P_{arl}(i,m)$被定义为：

$$P_{arl}(i,m) = \frac{A_a(i,m)}{A_g(m)}$$

式中，i=1981,…,2500 是年份；m=1,…,2433 是栅格要素的当前数量；$A_g(m)$是一个栅格元素 m 的总表面积；$A_a(m)$是一个栅格元素 m 的农业面积；$R_{kor}(i,m)$是修正因子。

(2) $P_{arl}(i,m)$的 Logistic 函数：

$$P_{arl}(i,m) = P_{arl}(1980,m) + \frac{P_{arl\max} - P_{arl}(1980,m)}{1 + \exp[c_1(m) - c_2(m)i]}$$

式中，$P_{arl\max}$ 是一个用户定义的栅格元素的相对农业面积的上限；$c_1(m)$是函数的斜率；$c_2(m)$是函数的拐点(例如，最大空地率的年份)。

(3) 拐点出现的年份：

$$i_T(m) = \frac{c_1(m)}{c_2(m)}$$

(4) 栅格元素的空地概率 $W_r(m)$：

$$W_r(m) = W_u(m) W_p(m) W_s(m) W_l(m)$$

$$W_u(m) = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left[\vartheta(n)\frac{1}{K(n)}\sum_{k=1}^{K(n)} P_{arl}(1970,k)\right]$$

式中，n=1，…，N 是围绕元素 m=1 的栅格元素圆环的序号；k=1，…，$K(n)$是第 n 个圆环中栅格元素的当前数量；$\vartheta(n) = 1/2^{n-1}$ 是权重因子。

$$W_p(m) = \frac{P_{np}(1970,m) - P_{nplim}}{P_{npmax} - P_{nplim}}$$

式中，P_{npmax} 是基质自然生产力的最高值，$P_{np}(1970, m)$；P_{nplim} 是要进行土地经济利用的最低自然生产力。

$$W_s(m) = \frac{F(m) - F_{min}}{F_{max} - F_{min}}$$

式中，$F(m)$是土壤因子数组；F_{max}是$F(m)$的最高值；F_{min}是$F(m)$的最低值。

$$W_1(m)=\frac{R_{kor}(1980,m)}{R_{kor}(1950,m)}\frac{1}{W_{1max}}$$

式中，W_{1max}是$W_1(m)$的最大值。

估算生物圈结构中过量CO_2分布的模型

Krapivin V F, Vilkova L P: 估算生物圈结构中过量CO_2分布的模型. Ecological Modelling, 1990, 50

（1）下面的方程系统描述了碳动力学：

$$\frac{dB_i}{dt}=F^i_{A,B}-F^i_{B,H}-V^i_B \qquad (i=1,\cdots,N)$$

$$\frac{dH_i}{dt}=F^i_{B,H}-F^i_{H,A}-V^i_H \qquad (i=1,\cdots,N)$$

$$\frac{dM}{dt}=F_{A,M}-F_{M,A}$$

$$\frac{dD}{dt}=F_{M,D}-F_{D,M}$$

$$\frac{dA}{dt}=\sum_{i=1}^{W}(F^i_{H,A}-F^i_{A,B}+V^i_B+V^i_H)S_i-F_{A,M}+F_{M,A}+V$$

式中，A是大气层中碳的数量；M和D分别是表层和深层海水中碳的数量；B_i和H_i是第i陆地地区的每单位面积中活的植物和死的土壤微生物生物量中的碳含量；V，V^i_B，V^i_H分别是由于工业CO_2排放和人类对植被和土壤影响导致的流入大气层中的碳；S_i是第i陆地地区的大小；N是陆地地区的数量。

（2）海洋中的碳流动：

$$F_{A,M}=K_{A,M}A$$

$$K_{A,M}=\frac{F^0_{A,M}}{A^0}$$

$$F_{D,M}=K_{D,M}D$$

$$K_{D,M}=\frac{1}{T_D}$$

$$F_{M,D}=K_{M,D}M$$

$$K_{M,D}=\frac{D^0}{M^0T_D}$$

$$F_{M,A}=K_{M,A}P(M,T)$$

$$K_{M,A}=\frac{K_{A,M}A^0}{P(M^0,T^0)}$$

式中，$P(M,T)$是海洋表层的碳局部压力；T_D是深层海水中碳的生存期；A^0、M^0、D^0、B^0_i、H^0_i是工业化时代以前各自的参数值。

$$F^i_{A,B}=F(T_i,W_i)[1+\beta(A/A^0-1)]$$

$$F^i_{B,H}=K_iB_i$$

$$K_i=F(T^0_i,W^0_i)/B^0_i$$

$$F^i_{H,A}=E_i(T_i,W_i)H_i$$

$$E_i(T^0_i,W^0_i)=F(T^0_i,W^0_i)/H^0(T^0_i,W^0_i)$$

式中，T_i和W_i分别是每年平均温度和每年总降水量；T^0_i和W^0_i是工业化时代以前各自的参数值。函数$F(T_i,W_i)$表示按照碳计算的每单位面积上植物每年的产量；$E(T_i,W_i)$是土壤中死亡有机物的特定分解率；系数K_i是植物生物量的特定消亡率。

两类取样环境的树木年轮生长量订正分析模型

吴祥定：黄河流域两类取样环境的树木年轮生长量订正分析。地理研究，1990，9(2)

（1）指数订正：

$$y=ae^{-bx}+k$$

式中，y为年轮宽度；a，b，k为由原序列求解得到的常系数；x为树龄。

（2）多项式订正：

$$y=a_0+a_1x+a_2x^2+\cdots+a_nx^n$$

式中，y为期望年轮宽度值；a_0，a_1，$\cdots$，a_n为回归系数。

（3）样条函数订正：

在条件$\sum_{i=0}^{n}\left[\frac{g(x_i)-y_i}{\delta y_i}\right]^2\leqslant S$的约束下使得$\int_{x_0}^{x}\left[g''(x_i)\right]^2dx$为最小。

式中，$g''(x_i)$为样条曲率；y_i入序列；δy_i为权重序列；S尺度参数。

热带森林退化模拟模型

Rotmans J, Swart R J: 模拟热带森林退化及其对全球气候的影响。Ecological Modelling, 1991,58

（1）森林退化模型：

封闭的热带雨林数量的动力学：

$$F_{cls}(t)=F_{cls}(t-1)+\int_{t-1}^{t}\left[-C_{OMM}(\tau)-I(\tau)-Y_{SHFTC}(\tau)-A_{defgc}(\tau)-D_{FLIVC}(\tau)\right]d\tau$$

开放的热带雨林数量的动力学：

$$F_{ou}(t)=F_{ou}(t-1)+\int_{t-1}^{t}\left[C_{OMM}(\tau)+F_{EFOR}(\tau)+Y_{SHFTC}(\tau)-F_{cls}(\tau)-D_{FLIVO}(\tau)-F_{wood}(\tau)-D_{EFYSH}(\tau)\right]d\tau$$

耕地的动力学：

$$A(t)=A(t-1)+\int_{t-1}^{t}\left[Y_{DMOTH}(\tau)-D_{EGAGR}(\tau)+A_{defgc}(\tau)+A_{defgo}(\tau)+D_{EFYSH}(\tau)\right]d\tau$$

式中，F_{cls}是封闭的热带雨林；F_{ou}是开放的热带雨林；A是耕地；A_{defgc}是扩展到封闭热带雨林的耕地；A_{defgo}是扩展到开放热带雨林的耕地；D_{FLIVC}是扩展到封闭热带雨林的牧场；D_{FLIVO}是扩展到开放热带雨林的牧场；Y_{SHFTC}是封闭热带雨林的轮作；D_{EFYSH}是开放热带雨林的轮作；Y_{DMOTH}是扩展到其他土地上的农地；C_{OMM}是商业木材生产的伐木业；F_{EFOR}是种植园的开发；F_{wood}是薪炭材收益；I_{ND}是工业或矿业工程；D_{EGAGR}是耕地退化；D_{EGGRA}是牧场退化。

(2) 模拟过程：

持久农业：

$$D_{MAGR}(t)=\frac{P_{op}(t)E_{c}(t)R_{ss}}{Y(t)\alpha(1-\beta-\gamma)}$$

式中，$D_{MAGR}(t)$是对农地的累积需求；$P_{op}(t)$是人口；$E_c(t)$是谷类消费；$Y(t)$是产量；R_{ss}是自足率；α是谷物中用作食物的部分；β是非谷类食物的耕种面积部分；γ是其他农作物产品的耕种面积部分。

$$D_{EGAGR}(t)=\frac{AGRIC(t)-AGRIC(0)}{PR\exp\{-[Y(0)/Y(t)][(AGRIC(t)-AGRIC(0))/AGRIC(0)]\}}$$

式中，D_{EGAGR}是农地中退化的土地；P是农业退化常数。

轮作或先锋耕作：

$$S_{hfcl}(t)=P_{OP}(t)R_{ur}\cdot S_{WFC}(C_{LF}/N_{fm})F_{c}$$

式中，$S_{hfcl}(t)$是轮作的面积；R_{ur}是农村部分；S_{WFC}是每年每户的农村清除；N_{fm}户人口数；F_c是休耕周期。

畜牧饲养：

$$D_{MGRS}(t)=G_{RASS}(0)CAT(t)/CAT(0)\cdot CAT_{PRD}(t)/CAT_{PRD}(0)$$

式中，$D_{MGRS}(t)$是牧场的累积需求；$G_{RASS}(t)$是牧场数量；$G_{RASS}(0)$是1990年牧场的初始数量；$CAT(t)$是牲畜的数量；$CAT(0)$是1990年牲畜的初始数量；$CAT_{PRD}(t)$是牲畜的生产力；$CAT_{PRD}(0)$是1990年的初始牲畜生产力。

伐木搬运业：

$$C_{OMM}(t)=C_{OMM}(85)\frac{IC_{WP}}{IP_{RI}}$$

式中，$C_{OMM}(t)$是商业木材生产引起的森林退化；$C_{OMM}(85)$是1985年商业木材生产引起的森林退化；I是指数；1985年$I=1$；C_{WP}是商业木材产量；P_{RI}是生产强度。

北太平洋海面温度年变化的计算公式

卢文芳：北太平洋海面温度的年变化型及区划。地理研究，1991，10(1)

(1) 贡献率计算公式：

$$R_S(i,j)=q_{ij}\times|q_{ij}|/\sum_{i=1}^{12}q_{ij}^{2}$$

式中，$R_S(i,j)$为第i种年变化型对第j个格点上的贡献率；q_{ij}为系数矩阵Q中第i行第j列元素。

(2) 累年年平均海温值计算公式：

$$\bar{t}_i=\frac{1}{12}\sum_{j=1}^{12}t'_{ij}$$

(3) 累年月平均海温对累年年平均值的方差计算公式：

$$V(t'_j)=\sum_{j=1}^{12}\left(t'_{ij}-\bar{t}_j\right)^2/12$$

(4) 累年月平均海温标准化计算公式：

$$\bar{t}'_{ij}=\frac{t'_{ij}-\bar{t}_j}{\left[V\left(\bar{t}'_j\right)\right]^{1/2}}$$

(5) 自由度计算公式：

$$\eta=\frac{N\Delta t}{T_0}$$

式中，N为样本容量；Δt为抽样时间间隔；T_0为特征

时间尺度，$T_0=\sum_{i=-\infty}^{r}R_{xx}(i\Delta t)R_{yy}(i\Delta t)\Delta t$ ，$R_{xx}(i\Delta t)$，$R_{yy}(i\Delta t)$ 分别为两要素序列的自相关系数，滞后步长为 $i\Delta t$。

白蚁排泄甲烷的生态环境效应模型

吴海宝：白蚁排泄甲烷的生态环境效应．生态学杂志，1991，10(3)

(1) 每只白蚁每日平均排泄甲烷量 P_d 模型：

$$P_d=\frac{\varepsilon V\rho M}{nN_0}\frac{C_f-C_i}{T}$$

式中，ε 为容器中除木块外空间体积与容器体积比值；V 为容器体积；ρ 为空气密度；M 为甲烷分子量；n 为容器中白蚁总数；N_0 为阿佛加德罗常数；C_f 为最后测定容器中甲烷浓度；C_i 为初始测定容器中甲烷浓度；T 为初始与最后测定时间间隔。

(2) 全球白蚁每年排泄甲烷的总量 P_G 模型：

$$P_G=\delta\sum_{n=1}^{n}\varepsilon_i m_{bi}A_i$$

式中，δ 为排泄产率；ε_i 为 i 生态区白蚁消耗生物物质分数；m_{bi} 为 i 生态区单位面积每年生物物质产量；A_i 为 i 生态区总面积。

每年碳的净吸收计算公式

leadley P W, Reynolds J F：北极莎草对气候变化的长期反应——一个仿真研究．Ecological Applications, 1992, 2(4)

(1) 每年碳的净吸收由下式给出：

$$C_{uptake}=c_{eff}f_1I_0$$

$$c_{eff}=c_{max}S_1S_TS_{c.[C]}S_{CO_2}$$

式中，c_{eff} 是被截获的光能转换成碳的效率；f_1 是被截取的入射光(I_0) 部分；c_{max} 是最大转换效率；S_I 是光饱和值；S_T 是空气温度值；$S_{c.[C]}$是不稳定的碳反馈；S_{CO_2} 是大气中二氧化碳浓度。

(2) 增长量：

$$g_{rowth}=R_{GR}\times\text{过冬结构}$$

$$R_{GR}=r_{max}S_{I\,rel}\min(S_{g.[C]},S_{g.[N]})S_T$$

式中，R_{GR} 是植物的相对增长率；r_{max} 是最大增长率；$S_{I,rel}$ 是相对季节长度；$S_{g.[C]}$ 和 $S_{g.[N]}$分别代表不稳定的碳和氮的影响值。

模拟站点的气温资料延长方法

陈志鹏，陈万隆：大别山东、北段热量资源短期考察资料的序列延长．地理研究，1992，11(3)

(1) 参考站点气温场公式：

$$T=\begin{bmatrix}T_{11} & T_{12} & \cdots & T_{1j} & \cdots & T_{1N}\\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots\\ T_{i1} & T_{i2} & \cdots & T_{ij} & \cdots & T_{iN}\\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots\\ T_{M1} & T_{M2} & \cdots & T_{Mj} & \cdots & T_{MN}\end{bmatrix}$$

式中，T_{ij} 为第 j 个参考站点的第 i 时刻温度值；N 为参考站点数；M 为参考站点序列长度。

(2) 利用自然正交函数对 T 分解：

$$T_{ij}=\sum_{k=1}^{N}S_{ik}V_{kj}$$

$$(i=1,2\cdots,M,\quad j=1,2\cdots,N)$$

式中，S_{ik} 和 V_{kj} 分别为时刻系数和特征向量。

(3) 模拟点的特征向量计算公式：

$$E_q=\sum_{i=L}^{P}\left(T_{iq}-\sum_{k=1}^{N}V_{ik}S_{kq}\right)^2=\min$$

式中，$T_{iq}=\sum_{k-1}^{N}V_{kq}S_{ik}$ 为模拟站点区域中存在测站点 $j=q$ 仅有的一个短期记录；V_{ik} 为模拟点的特征向量。

(4) 短序列资料的延长公式：

$$\begin{bmatrix}T_{1q}\\ T_{2q}\\ \vdots\\ T_{Mq}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N}\\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2N}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ S_{M1} & S_{M2} & \cdots & S_{MN}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}V_{1q}\\ V_{2q}\\ \vdots\\ V_{Nq}\end{bmatrix}$$

全球生态研究的数学模型

Krapivin V F：全球生态研究的数学模型．Ecological Modelling, 1993, 67

(1) 生物地球化学循环部分：

$$\frac{d\alpha_S(t)}{dt}=\sum_j H_{jS}-\sum_i H_{Si}$$

式中，$\alpha_S(t)$代表在 t 时刻媒介 S 中α元素含量；H_{jS} 和 H_{Si} 分别是α元素的输入和输出流；“和式”是对媒介 i 和 j 进行求和，它们与媒介 S 相互作用。

在大气、陆地和水面上发生的交换过程的模拟：

$$p_a = 0.421\,542\times10^{-18} M_C(273.15+T)$$

式中，p_a 是大气层中的 CO_2 分压；M_C 是大气层中 CO_2 的质量，单位是 t；T 是周围大气的温度，单位是℃

(2) 生物地理群落过程部分：

土壤植被构成的生物量($X(t,\phi,\lambda)$)平衡方程：

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \xi - \omega_x - \tau - \Sigma$$

式中，ξ 是实际的植物生产力；ω_x 和 τ 是与环境之间能量交换的自然准则(morality)和成本的数量；Σ 是生物量流失的人为原因。

$$\xi = \delta_c\delta_0(1+\alpha_T\Delta T/100)\cdot \exp[-\beta_1/X]\min\{\delta_e,\delta_z,\delta_W,\delta_N,\delta_S,\delta_P\}$$

式中，α_T 和 β_1 分别是生产对温度和生物量的依赖性指数；δ_θ 是 θ 因子的生产限制指数（e = 光照，z = 污染，W = 土壤湿度，N，S 和 P 分别是土壤中的氮、硫和磷)。

(3) 生物圈水分循环部分：

$$\frac{dW_{iH}}{dt} = W_{iSH} - W_{iHG} - \sum_{k=1}^{4} W_{iHO}^{k} \quad (i=1,\cdots,N_0)$$

式中，W_{iH} 是第 i 地区的地下水水位；W_{iSH} 是水分渗透；W_{iHG} 是灌溉水；W_{iHO} 是流入海洋的水分；N_0 是地区的数量。

(4) 气候部分：

大气温度是地球表层中 CO_2 (C_A)和水蒸气 W_A 的函数：

$$T = T_D + \Delta T(C_A, W_A)$$

式中，T_D 是特定(parenthropogenic)时期的温度。

$$\Delta T = \Delta T_C + \Delta T_W$$

式中，ΔT_C 和 ΔT_W 反映了大气层中由 CO_2 和 W_A 浓度波动所引起的 T 的变化。

(5) 种群统计学部分：

在第 i 地区，众多环境和社会因素对种群动力学的影响 G_i 反映在出生率 R_{Gi} 和死亡率 M_{Gi} 上。

$$R_{Gi} = (1-h_{Gi})K_{Gi}G_i\min\{H_{GVi}, H_{GGi}, H_{GMi}, H_{GAi}\}$$

$$M_{Gi} = \mu_{Gi}G_i\max\{H_{\mu Ai}, H_{\mu Gi}, H_{\mu Vi}\}$$

式中，h_{Gi} 是表示种群食物消费类型的系数；K_{Gi} 和 μ_{Gi} 分别是出生率和死亡率的常数部分；函数 $H_{GVi}(H_{\mu Vi})$，$H_{GGi}(H_{\mu Gi})$，H_{GMi} $H_{GAi}(H_{\mu Ai})$ 分别反映了以下这些因子对出生率(死亡率)的影响，这些因子包括食物供应、种群密度、生活标准和环境质量。

气候对地表变化的敏感性

Pielke R A, Schimel D S, Lee T J et al：大气-陆地生态系统的交互作用——联接模拟的含义，Ecological Modelling, 1993, 67

整个地球表面发出的长波辐射使到达地球的太阳辐射趋于平衡：

$$\sigma T_E^4 = \frac{1}{4}(1-A)S$$

式中，σ 是 Stefan-Boltzmann 常数；T_E 是地球平衡温度；A 是地球的行星反照率；S 是大气表层的太阳通量密度。

$$\Delta T_E = -1.52\times10^9\frac{\Delta A}{T_E^3}$$

式中，已知 S=1380W·m^{-2}。

大气和陆地生态系统之间碳交换的动态模型

Suzuki M, Goto N, Sakoda A：大气和陆地生态系统之间碳交换的简化动态模型。Ecological Modelling, 1993, 70

(1) 陆地生态系统的每个区室的碳平衡：

陆地生态系统包含三个区室：树叶，代表活生物量的光合作用部分；树干，代表活生物量的非光合作用部分；土壤，代表土壤有机物。

树叶中的碳平衡：

$$\frac{dC_1}{dt} = \alpha R_1^P - R_1^L$$

树干中的碳平衡：

$$\frac{dC_2}{dt} = (1-\alpha)R_1^P - R_2^R - R_2^L$$

土壤中的碳平衡：

$$\frac{dC_3}{dt} = R_1^L - R_2^L - R_3^D$$

式中，C_1 是树叶中的碳储量；α 是树叶的分配率；R_1^P 是光合作用率；R_1^L 是树叶的落叶率；C_2 是树干中的碳储量；R_2^R 是树干的呼吸作用率；R_2^L 是树干的落叶率；C_3 是土壤中的碳储量；R_3^D 是土壤中有机质的分解率。

(2) 区室中的碳流动：

树叶的光合作用：$R_1^P = \eta_{T-P}\eta_{W-P}r_1^P$

树干的呼吸作用：$R_2^R = \eta_{T-R}r_2^R$

土壤分解作用：$R_3^D = \eta_{T-D}r_3^D$

树叶的落叶：$R_1^L = r_1^L$

树干的落叶：$R_2^L = r_2^L$

式中，η_{T-P} 是依赖于温度的光合作用效率；η_{W-P} 依赖于土壤含水量的光合作用效率；r_1^P 是不考虑环境影响时的树叶基本光合作用率；η_{T-R} 是呼吸作用的温度依赖性；r_2^R 是树干的基本呼吸作用率；η_{T-D} 是分解作用的温度依赖性；r_3^D 是土壤有机物的基本分解率；r_1^L 和 r_2^L 分别是树叶和树干的基本落叶率。

(3) 温度对光合作用的影响：

$$\eta_{T-P} = \begin{cases} 0 & \left(T < T_{opt} - \frac{\Delta T}{2}, T > T_{opt} + \frac{\Delta T}{2}\right) \\ \cos\left(\frac{T - T_{opt}}{\Delta T}\pi\right) & \left(T_{opt} - \frac{\Delta T}{2} \leqslant T \leqslant T_{opt} + \frac{\Delta T}{2}\right) \end{cases}$$

式中，T 是温度（℃）；T_{opt} 是光合作用的最佳温度；ΔT 是光合作用活跃期的温度变化范围。

(4) 温度对呼吸作用和分解作用的影响：

$$\eta_{T-R} = 2^{(T-20)/10}$$

$$\eta_{T-D} = 2^{(T-20)/10}$$

(5) 土壤水分含量对光合作用的影响：

$$\eta_{W-P} = \begin{cases} 0 & (W_S < H_{WP}) \\ \frac{1}{H_{fc} - H_{WP}}(W_S - H_{WP}) & (W_S \geqslant H_{WP}) \end{cases}$$

式中，H_{WP} 是萎蔫点；H_{fc} 是田地容量。

解释气候变化的落叶林模型

Veroustraets F：一个简单的落叶林模型在碳动力学层次上解释气候变化影响方面的应用 Ecological Modelling, 1994, 75/76

(1) CO_2 的影响：

$$CO_{2\ effect} = \frac{F_{CO_2}}{F_{CO_2}^{ref}}$$

式中，F_{CO_2} 是一定时间里 CO_2 的同化作用率；$F_{CO_2}^{ref}$ 是在 1833 年 CO_2 的同化作用率。

(2) CO_2 亲合系数 $K_m^{CO_2}$ 的温度依赖性的估计：

$$K_m^{CO_2} = A\exp(-E_a / R_{gas}T)$$

式中，A 是系数；E_a 是亲合能；R_{gas} 是气体常数；T 是温度。

$$CO_{2\ effect} = \frac{[CO_2] - \frac{[O_2]}{2\tau}}{[CO_2]^{ref} - \frac{[O_2]}{2\tau}} \cdot \frac{K_m^{CO_2}\left(1 + \frac{[O_2]}{K_0}\right) + [CO_2]^{ref}}{K_m^{CO_2}\left(1 + \frac{[O_2]}{K_0}\right) + [CO_2]}$$

式中，τ 是 CO_2/O_2 的比率；$K_m^{CO_2}$ 是 CO_2 的 Rubisco 亲和力常数；K_0 是 O_2 的抑制常数；$[CO_2]$ 是 CO_2 的浓度；$[O_2]$ 是 O_2 的浓度；$[CO_2]^{ref}$ 是 1833 年的 CO_2 浓度。

生态系统模型中增长增效器函数

Kellomäki S, Hänninen H, Kolström M：北温带北部森林地区气候变暖对欧洲赤松林的损害计算 Ecological Applications, 1995, 5(1)

(1) 光的增效器（Y_1）：

$$Y_1 = A_1\{1 - \exp[A_2(A_L - A_3)]\}$$

式中，A_L 是光的相对量，A_1、A_2 和 A_3 是参数。

(2) 温度的增效器（Y_T）：

$$Y_T = 4(D_{max} - X)(X - X_{min})/(D_{max} - D_{min})^2$$

式中，D_{min} 是温度总和的最小值(单位：℃·d)；D_{max} 温度总和的最大值(单位：℃·d)，它使特殊树种的生存成为可能；X 是温度总和（单位：℃·d）。

(3) 土壤水的增效器(Y_W)：

$$Y_W = \{[(D_3 T_{GS} - F_j)/D_3 T_{GS}]\}^{0.5}$$

式中，T_{GS} 是生长季节的总天数；D_3 是要求物种在枯萎点(D_{RY})以下忍受土壤湿气的生长季节的最大比例(生长季节的总天数之外的)；F_j 是生长季节总天数中干旱天数所占的百分比。

(4) 土壤氮的增效器(Y_N)：

$$Y_N = (N_4 - N_5 C_{ONN})/1.7$$

式中，C_{ONN} 是叶片和松针中氮的浓度；N_4 和 N_5 是参数。

如果 $T_{S\,lgn} \geqslant T_{S\,scrit}$，木质化过程将会终止，并且有：

$$T_{S\,lgn} = \sum_{i=1}^{n}[T(i) - 5°C]$$

式中，$T_{S\,scrit}$ 是物种基因类型值；$T(i)$ 是第 i 天中平均大气温度；n 是从木质化过程开始以来的天数。木质化阶段之后，树木进入休息阶段

如果 $\sum_{i=1}^{n} M_r(i) \geqslant C_{r\,crit}$，休息阶段终止，$n$ 是休息

阶段开始以来的天数，并且有：

$$M_r(i)=\begin{cases}0 & (T(i)\leqslant -3.4^\circ C)\\ a_1T(i)+a_2 & (-3.4^\circ C<T(i)\leqslant 3.5^\circ C)\\ a_3T(i)-a_4 & (3.5^\circ C<T(i)\leqslant 10.4^\circ C)\\ 0 & (T(i)>10.4^\circ C)\end{cases}$$

式中，a_1、a_2、a_3和a_4是参数；$C_{U_{crit}}$是一个物种基因类型值。休息阶段结束后，树木进入了静止阶段。

如果$\sum_{i=1}^{n}M_q(i)>F_{U_{scrit}}$，静止阶段终止，$n$是自从静止阶段开始以来的天数，并且有：

$$M_q(i)=\begin{cases}0 & (T(i)\leqslant 0^\circ C)\\ \dfrac{a_5}{1+e^{a_6[T(i)-a_7]}} & (T(i)>0^\circ C)\end{cases}$$

式中，a_5、a_6、a_7是参数；是$F_{U_{crit}}$一个物种基因类型值。静止阶段结束后，树木进入了活跃阶段。

(5) 霜冻的损害：

在第 i 天中霜冻引起的相对增长量减少的后果(GF(i))作为耐霜力(H(i))和每日最低气温 $T_{min}(i)$的一个函数被计算：

$$GF(i)=\frac{1}{1+\exp\{b[H(i)-T_{min}(i)]\}}$$

式中，b 是决定温度范围宽度的斜率参数，在这个温度范围内霜冻损害由可以忽略不计开始增大。

一个减少全球气候模型计算量的计算方法

Oelschlägel B：一个通过使用统计学的天气生成器来减少全球气候模型计算量的方法. Ecological Modelling, 1995, 82

(1) 这个方法被用来将 GCM 栅格点可变的趋势转换成一个在目标位置附近的趋势：

$$Z_d=\sum_{k=1}^{K}(W_kZ_k)/\sum_{k=1}^{K}W_k$$

$$W_k=S_k^2\left(1+T_k/\sum_{l=1}^{K}S_l\right)$$

$$S_k=\begin{cases}1/d_k & (d_k\leqslant R/3)\\ 27(d_k/R-1)^2/(4R) & (R/3<d_k\leqslant R)\\ 0 & (d_k>R)\end{cases}$$

$$T_k=\sum_{l=1}^{K}S_k(1-\cos\theta_{kl})$$

式中，Z_d是在目标位置的内插值；Z_k是在全球气候模型栅格中的值；K是用于内插的栅格点的数目；R是影响半径；W_k是权重因子；S_k是权重因子 W_k 中与距离有关的部分；T_k是权重因子 W_k 中与方向有关的部分；d_k是栅格点 k 和目标位置之间的距离；θ_{kl} 是栅格点 k 和 l 在目标位置附近相交的球面角。

全球 N_2O 平衡模型

Kawashima H, Bazin M J, Lynch J M：全球 N_2O 平衡和氮肥. Ecological Modelling, 1996, 87

(1) 氮平衡：

$$\mathrm{d}M/\mathrm{d}t=F_{in}-F_3$$

$$F_{in}=F_{01}+F_{02}+F_1+F_2$$

$$F_3=M/\tau_1$$

式中，M是生物圈中反应氮的数量；F_{01}代表生物的氮固定；F_{02}是闪电的氮固定；F_1是化石燃料燃烧释放的反应氮；F_2是施加到农田中的肥料的比率；τ_1是反应氮的平均存留时间。

(2) N_2O 平衡：

$$\mathrm{d}N/\mathrm{d}t=G_{o_{ut}}+G_1+G_2-N/\tau_2$$

式中，N是对流层中 N_2O 的数量；$G_{o_{ut}}=\alpha F_3$，α代表反硝化作用产生的 N_2O 部分；G_1和G_2分别是来自化石燃料燃烧和工业时代生物量燃烧的流量；τ_2是对流层中 N_2O 的平均存留时间。

气候和植被交互作用的极小值模型

Svirezhev Y M, Bloh W：气候和植被交互作用的极小值模型——定性的方法. Ecological Modelling, 1996, 92

(1) 假定世界的气候仅由温度$T(x,t)$决定，并且动力学可由以下方程决定：

$$\frac{\partial T}{\partial t}=D_T\frac{\partial^2T}{\partial x^2}+\Psi-\sigma T^4$$

$$D_T=k/C$$

$$\sigma=\hat{\sigma}/C$$

$$\Psi=\frac{\hat{S}}{C}(1-A)$$

式中，A 是在已知点 x 处的星体表面反射率；$\hat{S}$ 是太阳常数；$\hat{\sigma}$ 是 Stefan-Boltzmann 常数；k 和 C 是参数

(2) 星体表面可能被植被覆盖，植被密度是$N(x,t)$，它的动力学特性由以下的 Logistic 方程描

述：

$$\frac{\partial N}{\partial t}=D_N\frac{\partial^2 N}{\partial x^2}+\alpha N-\gamma N^2$$

式中，α是增长函数的马尔萨斯参数；γN^2是由个体竞争推导出的死亡率；D_N是扩散因子。

自然植被的净第一性生产力 NPP 模型

周广胜，张新时：全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研究。植物生态学报，1996，20(1)

$$\text{NPP}=R_{\text{DI}}\cdot\frac{r\cdot Rn(r^2+Rn^2+r\cdot Rn)}{(r+Rn)(r^2+Rn^2)}\times$$

$$\exp\left(-\sqrt{9.87+6.25R_{\text{DI}}}\right)$$

式中，R_{DI}为辐射干燥度；Rn为年净辐射；r为年降水量。

基于分形方法的古温度推算公式和粒度分析

朱诚：分形方法在庐山第四纪沉积环境研究中的应用。地理研究，1996，15(3)

(1) 古温度推算公式：

$$T=a+bx^D=2.3+0.09x^{1.31}$$

式中，T为年平均气温；x为Fe^{3+}/Fe^{2+}的值；a，b为常数；D为分数维，其计算公式可表达为：

$$\begin{cases}R(\tau)/S(\tau)=c\left(\dfrac{\pi}{2}\right)^H\\ H=2-D\end{cases}$$

式中，$R(\tau)$、$S(\tau)$分别为时间序列的极差和标准差；τ为时间序列的采样间隔时段；c为常数；H为 Hurst 指数。

(2) 粒度分析：

1) 粒度分布关系式：

$$N(r)=c/r^D$$

式中，N为粒径小于r的颗粒数目；D为分数维；c为常数；r为颗粒直径。

2) 粒度分数维计算公式：

$$D=3-\frac{\log_2\dfrac{m_1}{M_0}-\log_2\dfrac{m_2}{M_0}}{\log_2 r_1-\log_2 r_2}$$

式中，m_1、m_2分别为样品中粒径为r_1、r_2的两组颗粒的质量；M_0为样品的总质量。

生物量和光能利用效率的测定模型

张祝平，丁明懋：鼎湖山亚热带季风常绿阔叶林的生物量和光能利用效率。生态学报，1996，16(5)

1. 生物量和生产量的测定

(1) 生物量模型：

$$\lg W=\lg a+b\lg(D^2H)$$

式中，W为植物相应部分的干生物量；D，H分别为胸径和树高。

(2) 净生产量 Bn 模型：

$$\text{Bn}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(wt_2i-wt_1i)+L+D+G}{4S}$$

式中，S为样地面积；wt_2i，wt_1i分别为第2、1次调查时的生物量；L为凋落物量(每月收集一次)；D为死木(每年调查一次)；G为动物、昆虫啃食量(每季调查一次)。

2. 植物光合、呼吸速率的测定

(1) 净光合速率F_n模型：

$$F_n=\frac{\Delta C\cdot V}{A\cdot 10^3}\frac{44}{22.4}\frac{273}{273+T}\frac{P}{101\,322}$$

(2) 呼吸速率R模型：

$$R=\frac{\Delta C\cdot V}{W_{gd}10^3}\frac{44}{22.4}\frac{273}{273+T}\frac{P}{101\,322}$$

式中，ΔC为叶室或呼吸装置内外气体CO_2的含量之差；V为叶室或呼吸装置内外气体流量；A为叶面积；W_{gd}为呼吸器官的干重；T为叶室或呼吸装置内的温度；P为大气压。

3. 群落植物生产力和光能利用效率的计算

(1) 净生产力Pn模型：

$$Pn=Pg-Rg'-Rg$$

$$Pg=9.4FnI_{la}t$$

$$Rg'=9.4RI_{la}t$$

$$Rg=9.4RWt$$

(2) 光能利用效率模型：

$$\varepsilon F=\frac{\text{各层植物固定的能量(kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})\times 100}{\text{各层植物吸收}P_{\text{AR}}\text{能量(kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})}$$

$$\varepsilon P=\frac{Pg}{I_{\text{abs}}}\times 100$$

式中，Rg' 为叶子的夜呼吸量；Rg 为其他各部分器官的呼吸量；t 为光合作用或呼吸时间；W 为呼吸器官干重；I_{la} 为叶面积指数；ε F 为各层植物对吸收 R_{pa} 能量的利用效率；ε P 为群落对 R_{pa} 能量的利用效率；I_{abs} 为单位土地面积吸收的 R_{pa} 能量。

采用树木年轮资料重建山东沂山地区200多年来的湿润指数

沈长泗，陈金敏，张志华等：采用树木年轮资料重建山东沂山地区200多年来的湿润指数 1998，17(2)

(1) 湿润指数计算公式：

$$MI = P/T$$

式中，MI 为湿润指数；P，T 分别为同一期间降水和气温的平均值。

(2) 树轮指数重建湿润指数的转换函数：

$$Y = 14.81X + 5.65$$

式中，Y 为湿润指数的预报值；X 为轮宽指数。

(3) 缩减误差值计算公式：

$$E_r = 1.0 - \left[\sum_{i=1}^{n}\left(\hat{Y}_i - Y_i\right)^2 / \sum_{i=1}^{n} Y_i^2\right]$$

式中，E_r 为缩减误差值；$\hat{Y}_i$，Y_i 分别为观测值和估计值与非独立资料平均的偏差。

预测植物功能类型和生物痕迹气体流的全球植被动态模型

Potter C S, Klooster S A：预测植物功能类型和生物痕迹气体流的全球植被动态模型，Global Ecology and Biogeography, 1999, 8

(1) 潜在的植物绿色系数（PVG）：

当 GDD < 3000 时：

$$PVG_{max} = e^{0.715\ln(GDD)+0.377\ln(PPT)-0.448}$$

当 GDD=3000 时：

$$PVG_{max} = 189.89AMI + 44.02\ln(PPT) + 227.99$$

$$PVG_{min} = \exp^{7.63910^{3}GDD+5.07310^{3}PPT-0.499\ln(CDD)+4.054}$$

式中，PVG_{max} 和 PVG_{min} 是 PVG 每年的最高值和最低值；GDD 是生长度数・天数；CDD 是冷却度数・天数；PPT 是每年的降水总量；AMI 是每年的潮湿指数。

(2) 被吸收的光合作用活动辐射(FPAR)：

$$FPAR = \min\left(\frac{SR}{SR_{max} - SR_{min}} - \frac{SR_{min}}{SR_{max} - SR_{min}}, .95\right)$$

式中，$SR = \dfrac{1+PVG}{1-PVG}$；$SR_{min}$ 表示没有植被覆盖的土地面积的 SR。

(3) 净初级生产力（NPP）：

$$NPP = S \cdot FPAR \cdot \varepsilon_{max} \cdot T \cdot W$$

式中，ε_{max} 来自于以前土地 NPP 估计值的校准；T 是温度压力；W 是水分压力。

Kira 指数

刘春迎：KIRA 指标在中国植被与气候关系研究中的应用 植物生态学报，1999，23(2)

(1) 温暖指数 WI 模型：

$$WI = \sum_{i=1}^{n}(t_i - 5)$$

式中，t_i 为平均温度为 5℃以上的第 i 个月的平均温度；n 为平均气温大于 5℃的月数。

(2) 寒冷指数 CI 模型：

$$CI = -\sum_{i=1}^{n}(5 - t_i)$$

式中，CI 即月平均气温低于 5℃的总和。

(3) 干燥度指数 K 模型：

$$K = \frac{P}{WI + 20} \qquad (WI < 100)$$

$$K = \frac{2P}{WI + 140} \qquad (WI > 100)$$

式中，P 为年平均降水量。

人-地关系平衡模型

谢高地，成升魁，丁贤忠：人口增长胁迫下的全球土地利用变化研究，自然资源学报，1999，14(3)

$$PG_d = L_c G_y \tag{a}$$

式中，P 为人口总量；G_d 为满足人口基本营养需求的人均粮食年需求量；L_c 为耕地面积；G_y 为耕地年生产率。

现实情况下人-地关系总是不平衡的，这种不平衡的程度可以表示为：

$$f = PG_d - L_c G_y \tag{b}$$

式中，f 值可以用来表示人口对土地利用变化的压力，在特定的耕地生产率条件下，当 $f = 0$ 时，现有土地利用覆盖格局保持不变；当 $f > 0$ 时，人口增长胁迫耕地

面积扩大，草地和森林面积减小；当f< 0时，土地利用格局可向有利于生态环境的方向发展。

根据(a)式可以做出如下理论推算：

(1) 一定耕地面积和生产率条件下第 i 年的人口承载能力可表达为：

$$P_i = C_{Li} G_{Yi} / G_{Di}$$

第 i 年的人口承载能力压力可表达为：

$$f_{P_i} = p_{io} - p_i = p_{io} - C_{Li} G_{Yi} / G_{Di}$$

式中，P_{io}为第 i 年的实际人口数。

(2) 一定人口和耕地生产率条件下第 i 年的耕地面积需求可表达为：

$$C_{Li} = P_i G_{Di} / G_{Yi}$$

第 i 年的耕地面积需求压力可表达为：

$$f_{CLi} = C_{Lio} - C_{Li} = C_{Lio} - P_i G_{Di} / G_{Yi}$$

式中，C_{Lio}为第年 i 的实际耕地面积。

(3) 一定人口和耕地面积条件下第 i 年的耕地生产率可表达为：

$$G_{Yi} = P_i \, G_{Di} / C_{Li}$$

第 i 年的耕地生产率压力可表达为：

$$fG_{Yi} = G_{Yio} - G_{Yi} = G_{Yio} - P_i G_{Di} / C_{Li}$$

式中，G_{Yio}为第 i 年的实际耕地生产率。

离心力计算公式

黄玫，彭公炳，沙万英：地球自转速率变化影响大气环流的事实及机制探讨. 地理研究，1999，18(3)

$$F = m\omega^2 R \cos\Phi$$

式中，F 为离心力；ω 为角速率；Φ为纬度；m 为质点质量；R 为地球半径。

生物圈能量转移模型

Knorr W：陆地生物圈每年和年内 CO_2 交换——基于过程的模拟和不确定性. Global Ecology and Biogeography. 2000, 9

(1) 能量和水平衡：

植物有效水的最大储量 $W_{s,max}$：

$$W_{s,max} = \sum_{i=1}^{n_s} d_i \left[\Theta_f(i) - \Theta_w(i) \right]$$

式中，$\Theta_w(i)$ 是土层 i 中永久萎蔫点的土壤水的体积含量；$\Theta_f(i)$ 是已知在 2 mm·d^{-1} 的水压传导性下土地容量中的土壤水体积含量；n_s 是模型中的土层数量；d_j 是每一层的厚度。

(2) 热函流 H_v：

$$H_v = \rho c_p G_a (T_v - T_a) = R_{nv} - \lambda (E_t + E_i)$$

式中，T_v是植物或者植冠的温度；T_a是大气温度；ρ 和 c_p是大气的密度和比热；λ是水蒸气的潜热；E_t和 E_i分别是通过气孔和直接蒸发的叶片截留降水的土壤水分蒸发蒸腾损失总量。

(3) 净植冠辐射 Rnv：

$$R_{nv} = (1 - t_{l,v})(\varepsilon_a \sigma T_K^4 - \varepsilon_s \sigma T_K^4 - G) + (1 - \rho_v - a_{s,0}) f_{PAR} R_s$$

式中，$t_{l,v}$是植冠的长波透射率；T_K是以绝对温标为单位的大气温度；G 是地面热量流；ε_s是表面热辐射；σ 是斯蒂芬-玻尔兹曼常数；ε_a 是大气层对向下流量的热辐射；ρ_v 是密集植物的反射率；$a_{s,0}$是被土壤下层吸收的入射辐射；f_{PAR} 是吸收的光合作用活动辐射；R_s是入射太阳辐射。

(4) 碳平衡：

$$P_{np} = P_{gp} - R_M - R_G$$

式中，P_{gp}是毛初级生产力；R_M是总的植物维持呼吸；R_G 是一个附加项，称为"生长呼吸作用"，可表达为 $R_G=F_{R,G}P_{np}=f_{R,G}(P_{gp}-R_M-R_G)$，$f_{R,G}$是标准呼吸消耗。

(5) 土壤或异养呼吸(SR)：

$$\mathrm{SR} = f_a k_f C_f + k_s C_s$$

式中，C_f是能迅速腐烂的枯枝落叶的数量；C_s是慢速腐烂的枯枝落叶的数量，且有 $C_s = \dfrac{\overline{P_{np}} - f_a \overline{k_f C_f}}{k_s}$，$\bar{\ }$ 表示13 年的平均值；f_a是进入大气层中的枯枝落叶损失部分；k_f，k_s经验常数。

(6) 生物气候学：

受叶面积指数(I_{la})限制的温度 $\Lambda_T(t)$：

$$\Lambda_T(t) = \begin{cases} 0 & (T_{0.5}(t) < T_\varphi) \\ \hat{\Lambda}\left\{1 - \left(\dfrac{\hat{T}_\varphi - T_{0.5}(t)}{\hat{T}_\varphi - T_\varphi}\right)^2\right\} & (T_\varphi < T_{0.5}(t) < \hat{T}_\varphi) \\ \hat{\Lambda} & (T_{0.5}(t) > \hat{T}_\varphi) \end{cases}$$

式中，T_φ 是叶片受到遮挡的温度；$\hat{T}_\varphi$ 是最大限制温度；$\hat{\Lambda}$ 是最大或者饱和叶面积指数(I_{la})；$T_{0.5}$ 是 0.5m

上层深度处的温度

辐射强度增加时植物的相互作用模型

Füssler J S, Gassmann F：大气层的动态角色——辐射强度增加时植物的相互作用　Global Ecology and Biogeography, 2000, 9

下面的模型刻画了温和的中纬度地区的一个 500 km× 500km 的均质区域的动力学。

1. 表层能量平衡模型

(1) 表层能量平衡：

$$R_{sw}^{net} + F = LE + H + R_{lw}^{net}$$

(2) 在表层被吸收的净短波辐射：

$$R_{sw}^{net} = R_{sw}[1 - \alpha(1-N) - \tilde{\alpha}N - a]$$

(3) 发出的净长波辐射：

$$R_{lw}^{net} = [1 - b(1-N) - \tilde{b}N]\sigma T_s^4$$

(4) 每年平均表面温度的扩展：

$$T_s = T_0 + \Delta T$$

(5) 每年热函的线性流动：

$$H(\Delta T) = H_0 + \Delta T\frac{dH}{dT}$$

(6) 每年潜在蒸散的线性流动：

$$E_{pot}(\Delta T, \tau) = \left(E_0 + \Delta T\frac{dE}{dT}\right)[\tau(1 - r_{soil}) + r_{soil}]$$

(7) 每年潜在蒸散的过程：

$$E_{pot}^d(t) = E_{pot} - A_E\cos\frac{2\pi t}{1yr}$$

(8) 每年实际蒸散：

$$E = E_{pot} - \varepsilon(E_{pot})$$

(9) 综合产量干旱参数 ε：

$$\varepsilon(E_{pot}) = \frac{A_E}{\pi}\sqrt{1 - \left(\frac{E_c - E_{pot}}{A_E}\right)^2} - \frac{E_c - E_{pot}}{\pi}\cos\frac{E_c - E_{pot}}{A_E}$$

2. 植被动力学模型

(1) 均质景观的生物量动力学：

$$\frac{dM}{dt} = g - Ml$$

(2) 温度和干旱压力对生物量收获的影响：

$$g = g_0 f_{gT}(T_s) f_{g\varepsilon}(\varepsilon)$$

(3) 生长-温度之间的关系：

$$f_{gT}^d(T_s^d) = \begin{cases} \dfrac{4(T_{max} - T_s^d)(T_s^d - T_{min})}{(T_{max} - T_{min})^2} & (T_{min} < T_s^d < T_{max}) \\ 0 & (其他) \end{cases}$$

(4) 每年的温度依赖性生长因子：

$$f_{gT}(T_s) = \frac{1}{c_{norm}}\int_0^1 f_{gT}^d\left(T_s - A_T\cos\frac{2\pi t}{1yr}\right)dt$$

(5) 干旱对生物量增加的影响：

$$f_{g\varepsilon}(\varepsilon) = \begin{cases} 1 & (\varepsilon \leqslant \varepsilon_{cg}) \\ \dfrac{1}{1 + C_g(\varepsilon - \varepsilon_{cg})} & (\varepsilon > \varepsilon_{cg}) \end{cases}$$

(6) 依赖于干旱的损失因子：

$$l = l_0 f_{l\varepsilon}(\varepsilon)$$

(7) 干旱对生物量损失的影响：

$$f_{l\varepsilon}(\varepsilon) = \begin{cases} 1 & (\varepsilon \leqslant \varepsilon_{cl}) \\ 1 + C_l(\varepsilon - \varepsilon_{cl})^2 & (\varepsilon > \varepsilon_{cl}) \end{cases}$$

(8) 蒸腾指数对生物量的依赖性：

$$\tau = M^{r_T}$$

(9) 临界土壤水分蒸发蒸腾损失总量对生物量(地下)的依赖性：

$$E_c = E_{c0}[(1 - r_M) + r_M M]$$

模型变量：

式中，E 是实际每年的土壤水分蒸发蒸腾损失总量；E_{pot} 是潜在每年的土壤水分蒸发蒸腾损失总量；E_{pot}^d 是潜在土壤水分蒸发蒸腾损失总量的每年过程；E_c 是土壤水分蒸发蒸腾损失总量的临界极限；F 是外力；$f_{g\varepsilon}$ 是依赖于干旱压力的生长因子；f_{gT} 是每年温度依赖性生长因子；f_{gT}^d 是每天温度依赖性生长因子；g 是生物量收获；H 是热函；l 是生物量损失；M 是正规化的生物量；R_{sw}^{net} 是进入的净短波辐射；R_{lw}^{net} 是

发出的净长波辐射；t 是时间；T_s 是每年平均表面温度；T_s^d 是温度的每年过程；ΔT 是 T_s 与 T_0 的差值；ε 是干旱参数；τ 是蒸发指数。

模型参数：

式中，a 是大气吸收；A_T 是表面温度的每年振幅；是长波背景辐射因子(晴天)；$\tilde{b}$ 是长波背景辐射因子(100%阴天)；C_g 是收获的干旱依赖性参数；C_l 是损失的干旱依赖性参数；$\frac{dE}{dT}$ 是土壤水分蒸发蒸腾损失总量在 $T_s=T_0$ 时的派生值；$\frac{dH}{dT}$ 是热函在 $T_s=T_0$ 时的派生值；E_0 是在 $T_s=T_0$ 时的土壤水分蒸发蒸腾损失总量；E_{c0} 是土壤水分蒸发蒸腾损失总量的临界极限；g_0 是基本生物量收获；L 是蒸发潜热；l_0 是基本的生物量损失；N 是多云；r_{AE} 是每年 E_{pot}^d 的振幅；r_M 是 E_c 依赖于生物量 M 的部分；r_{soil} 是 E_{pot} 独立于植物的部分；r_t 是生物量-蒸腾关系中的指数；R_{sw} 是大气层顶部收入的太阳辐射；T_0 是每年平均表面温度；T_{max} 是最高生长温度；T_{min} 是最低生长温度；α 是反射率和散射率(晴天)；$\tilde{\alpha}$ 是反射率、散射率和云层的吸收率(100% 阴天)；ε_{cg} 是生长减慢的临界干旱度 ε；ε_{cl} 是损失增大的临界干旱度 ε；σ 是辐射常数。

陆地生态系统氮循环模型

Lin B, Akiyoshi S, Shibasaki R et al: 陆地生态系统中全球生物地球化学氮循环模型. Ecological Modelling, 2000, 135

(1) 植被方程：

$$\frac{dV_C}{dt} = P_{gp} - T_{RRC} - (F_{LC} + F_{TRC})$$

$$\frac{dV_N}{dt} = N_{UPTAKE} - (F_{LN} + F_{TRN})$$

(2) 有机土壤方程：

$$\frac{dD_C}{dt} = (F_{LC} + F_{TRC}) + C_{FIX} - C_{DR} - C_{DH}$$

$$\frac{dD_N}{dt} = (F_{LN} + F_{TRN}) + C_{FIX} - N_{MIND} - M_{DH}$$

$$\frac{dH_C}{dt} = C_{DH} - C_{HR} - C_{HCAR}$$

$$\frac{dH_N}{dt} = N_{DH} - NMIN_H - N_{HCAR}$$

(3) 无机土壤方程：

$$\frac{dA}{dt} = N_{MIND} + NMIN_H + D_{Amm} - N_{UPTAKE}\frac{A}{A-N} - F_{nitr} - A_{VOL}$$

$$\frac{dN}{dt} = F_{nitr} - N_{gas} - D_{Nit} - N_{uptake}\frac{N}{A+N} - F_{DENITR} - F_{leach}$$

式中，V_C 为植物中碳的潜在储存量(potential storage of carbon in vegetation)(kg·m^{-2})；V_N 为植物中氮的潜在储存量(potential storage of nitrogen in vegetation)(kg·m^{-2})；D_C 为土壤碎屑层中碳的潜在储存量(potential storage of carbon in detritus)；D_N 为土壤碎屑层中氮的潜在储存量(potential storage of nitrogen in detritus)；H_C 为土壤腐殖层中碳的潜在储存量(potential storage of carbon in humus)；H_N 为土壤腐殖层中氮的潜在储存量(potential storage of nitrogen in humus)；A 为氨态氮的潜在储存量(potential nitrogen storage as in ammonium)；N 为硝酸盐态氮的潜在储存量(potential nitrogen storage as in nitrate)；P_{gp} 为总初级生产力中光合作用率(flux of photosynthesis as in gross primary production)；C_{TRR} 为树干和树根的呼吸作用率(flux of respiration of trunk and root)；F_{LC} 为落叶携带的碳的流失率(flux of litter-fall from leaf as in carbon)；F_{LN} 为落叶携带的氮的流失率(Flux of litter-fall from leaf as in nitrogen)；F_{TRC} 为枝干或根的掉落携带的碳的流失率(flux of litter-fall from trunk/root as in carbon)；F_{TRN} 为枝干或根的掉落携带的氮的流失率(flux of litter-fall from trunk/root as in nitrogen)；N_{uptake} 为植物的氮的吸收率(flux of nitrogen uptake by plant)；C_{FIX} 为以氮化合物形式的碳固化率(flux of carbon fixation as in nitrogen)；C_{FIX} 为氮固化率(flux of nitrogen fixation as in nitrogen)；C_{DR} 为落叶层中碳的分解率(flux of detritus decomposition as in carbon)；N_{MIND} 为落叶层中氮的无机化率(flux of detritus minerilisation as in nitrogen)；C_{DH} 为落叶层中碳的腐殖率(Flux of detritus huminification as in carbon)；N_{DH} 为落叶层中氮的腐殖率(flux of detritus huminification as in nitrogen)；C_{HR} 为腐殖层中碳的分解率(flux of humus decomposition as in carbon)；$NMIN_H$ 为腐殖层中氮的无机化率(flux of humus minerilisation as in nitrogen)；C_{HCAR} 为腐殖层碳化的碳损失率(flux of humus carbonisation as in carbon)；N_{HCAR} 为腐殖层碳化的氮损失率(flux of humus carbonisation as in nitrogen)；D_{Amm} 为氨态氮沉积率(flux of nitrogen deposition as in ammonium)；D_{Nit} 为硝酸盐态氮沉积率(flux of nitrogen deposition as in

nitrate)；F_{nitri} 为硝酸盐化率(flux of nitrification)；N_{gas} 为硝酸盐化过程中气体状散逸率(flux of gaseous emission during nitrification process)；A_{VOL} 为氨态氮挥发率(flux of ammonia volatilization)；D_{ENITR} 为反硝酸化率(flux of denitrification)；F_{leach} 为硝酸盐态氮淋滤率(flux of nitrate leaching)。

(4) 氮流量方程：

$$P_{gp}=f_{GPP,T}(T)f_{GPP,SW}(W_S)f_{GPP,N}(N_{av})P_{gpmax}$$

$$C_{FIX}=r_{NFIX}[f_{SYF,T}(T)+f_{NSYF,T}(T)]$$

式中，r_{NFIX} 是生态系统的生物固定能力。

$$F_{ICXC}=C_{NFIX}C_{FIX}$$

式中，C_{NFIX} 时碳氮比。

$$D_{Amm}=P_{RE}r_{RAIN}\frac{1}{3}+R_{DEPO,dry,Amm}$$

$$D_{Nit}=P_{RE}r_{RAIN}\frac{2}{3}+R_{DEPO,dry,Nit}$$

式中，P_{RE} 是降水量；r_{RAIN} 是降水中氨及硝酸盐浓度；$R_{DEPO,dry,Amm}$ 和 $R_{DEPO,dry,Nit}$ 分别是 NH_4^+ 及 NO_3^- 的干沉降。

$$H_{CARC}=r_{SPAN}(H_C)$$

$$N_{HCAR}=C_{HCAR}C_{N_{CAR}}$$

式中，r_{SPAN} 是腐殖层停留周期(a)；$C_{N_{CAR}}$ 腐殖过程碳化时的碳氮比

$$N_{uptake}=\frac{N_{max}K_{s,uptake}NAV}{k_{UPTAKE}+K_{s,uptake}NAV}e^{0.0693T}$$

$$A_{VOL}=5.8\times10^{pH-10}A$$

$$F_{nitri}=\mu_{NIT}f_{NIT,SW}(W_S)f_{NIT,T}(T)A$$

$$N_{gas}=\mu_{NIT,gas}F_{nitri}$$

$$F_{DENITR}=\mu_{DENI}f_{DENI,T}(T)f_{DENI,SW}(W_S)N$$

$$F_{leach}=K_{\theta}\frac{N}{2\phi W_S/W_{FC}}$$

式中，k_{UPTAKE} 是植物氮吸收速率为最大值的一半时的可用氮浓度；μ_{NIT} 是硝化常数；$\mu_{NIT,gas}$ 硝化过程中气体散逸速率常数；μ_{DENI} 是反硝化常数。

区域初级生产力与植物结构间相互关系的模拟模型

Gao Q, Yu M, Yang X：气候变化假设下区域初级生产力与植物结构间相互关系的模拟分析 Ecological Modelling, 2000,131

(1) 初级生产力与植物结构变化耦合的区域植物动力学模型：

$$\frac{\partial m_g^i}{\partial t}=p_g^i(t,w_j)NP_i-G_g^i(t,w_j,T_m,m_n^i)-D_g^i(t,m_g^i)$$

$$\frac{\partial m_n^i}{\partial t}=\frac{\alpha^i}{\rho^2\cos\theta}\left[\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\cos\theta\frac{\partial m_g^i}{\partial\theta}\right)+\frac{1}{\cos\theta}\frac{\partial^2 m_g^i}{\partial\varphi^2}\right]+$$

$$NP_ip_n^i(t,w_j)-G_g^i(t,w_j,T_m,m_n^i)-D_n^i(t,m_n^i)$$

式中，m_g^i 是所有植物类型中的绿色生物量；m_n^i 是非绿色生物量；w_j 描述了三个土壤层；NP_i 代表了净初级生产率；$p_g^i(t,w_j)$ 和 $p_n^i(t,w_j)=1-p_g^i(t,w_j)$ 是绿色与非绿色生物量的分配系数；$G_g^i(t,w_j,T_m,m_n^i)$ 是萌芽率，描述了在时刻 t 从非绿色生物量向绿色生物量的能量流；$D_g^i(t,m_g^i)$ 和 $D_n^i(t,m_n^i)$ 分别定义了两者由于死亡或收获导致的减少率；α^i 是与植物种子传播有关的系数。以上两个方程描述了生物量动力学。

(2) 净初级生产率的定义可表达为：

$$P_m=A_c^im_g^i\exp\left[-\left(\frac{T_m-T_{opt}^i}{S_T^i}\right)^2\right]\times$$

$$\sum_{j=1}^{3}\beta_j^i\frac{w_j}{W_{0j}^i}\frac{R_m}{K_R+R_m}\frac{C_m}{K_C+C_m}\left(1-\sum_{k=1}^{n}\gamma_{ki}m_k^i\right)$$

式中，T_m，R_m 和 C_m 分别是月平均气温、月总日照幅射量和月平均大气 CO_2 浓度；T_{opt}^i 和 S_T^i 分别是植物类型 i 最适宜温度和最高耐受温度；K_R 和 K_C 分别是日照强度和 CO_2 浓度的半饱和值；W_{0j}^i 是在植物类型 i 下第 j 层土壤的饱和土壤水分量；系数 β_j^i 描述了净初级生产率对土壤水分的依赖；如果植物类型 i 的根在土壤层 j 中存在，则 β_j^i=1，否则，β_j^i=0；系数 γ_{ki} 描述了植物类型 k 对 i 的光遮蔽效应。

(3) 气候与植物结构函数形式的净初级生产力：

$$P_{np}=f(C,I)=f(C_0,V_0)+$$

$$\frac{\partial f}{\partial C}(C-C_0)+\frac{\partial f}{\partial I}I+\frac{1}{2}\frac{\partial^2 f}{\partial C\partial I}(C-C_0)I$$

式中，C 代表气候；I 代表植物类型间的相互作用；C_0 代表了现在的气候状态；V_0 代表了现在的植物结构。

静态植物结构下 P_{np} 的计算可表达为：

$$P_{nps}=f(C_0,0)+\frac{\partial f}{\partial C}(C-C_0)$$

植物类型间相互作用导致的 P_{np} 的相对变化(ΔP_{np})的计算可表达为：

$$\Delta P_{np}=\frac{P_{np}-P_{nps}}{P_{np0}}=\frac{\dfrac{\partial f}{\partial I}+\dfrac{1}{2}\dfrac{\partial^2 f}{\partial C\partial I}(C-C_0)}{f(C_0,0)}I=A(\hat{C})I$$

式中， $A(\hat{C})=\left[\frac{\partial f}{\partial I}+\frac{1}{2}\frac{\partial^2 f}{\partial C\partial I}(C-C_0)\right]\Big/f(C_0,0)$ ； $\hat{C}=C-C_0$。

(4) 植物类型间相互作用的定量化模型:

$$\Delta P_{np}=A(\hat{C})I=A(\hat{C})(k_0+k_1V)=K_0+K_1V$$

式中，V 代表植物结构的某些定量指数；对 V 的线性近似可得出 $I=k_0+k_1V$ ；k_0 和 k_1 是常数；$K_0=A(\hat{C})k_0$ 是截距；$K_1=A(\hat{C})k_1$ 为斜率，K_1 可作为某种植物结构与 P_{np} 的耦合强度因子。

陆地生态模型

Huntingford C, Cox P M, Lenton T M.：一个简单的陆地生态模型对全球变化的反应. Ecological Modelling, 2000, 134

(1) 生态系统模型:

$$\frac{dC_B}{dt}=(1-\lambda_v)\Pi-\lambda_c C_B$$

$$C_B\frac{d\upsilon}{dt}=\lambda_v\upsilon(1-\upsilon)\Pi-\gamma_v\upsilon C_B$$

$$\frac{dC_S}{dt}=\upsilon\Lambda-R_S$$

$$\frac{d}{dt}(\upsilon C_B)=\upsilon\Pi-\upsilon[C_B(\gamma_C+\gamma_v)+\lambda_v\upsilon\Pi]$$

$$\Lambda=C_B(\gamma_C+\gamma_v)+\lambda_v\upsilon\Pi$$

式中，C_B(kg · m^{-2})为植物碳；C_S(kg · m^{-2})为土壤碳；Π为净初级生产力(NPP)(kg · m^{-2} · a^{-1})；Λ为植物落叶碳；$1-\lambda_v$ 是 P_{np} 中分配供已有植被区域生长的碳的比例，γ_C(a^{-1})是植被碳更新率；γ_v 是干扰率；$1-v$ 表示由于自遮蔽效应导致的附加的干扰；R_S 是土壤呼吸作用(soil respiration)(kg · m^{-2} · a^{-1})。

(2) 分配系数λ_v:

$$\lambda_v=\begin{cases}0 & (L<L_{min})\\ \dfrac{L-L_{min}}{L_{max}-L_{min}} & (L_{min}<L<L_{max})\\ 1 & (L>L_{max})\end{cases}$$

式中，L 为树叶覆盖指数(m^2 · m^{-2})； L_{max} 是最大树叶覆盖指数，可取值为 10；L_{min} 是最小树叶覆盖指数，可取值为 4。

树叶覆盖指数与植物碳之间可简单地用线性关系描述：

$$C_B=\sigma L$$

式中，σ为比例常数。以上所有方程构成一个在给定 CO_2 进出流量下的少参数的植被动力学模型。

(3) 顶部树叶净光合作用率(kg · m^{-2} · a^{-1}):

$$A_1=P_1-R_{d,1}$$

式中，P_1 为顶部树叶总光合作用率(kg · m^2 · a^{-1})；$R_{d,1}$ 顶部树叶暗呼吸作用率(kg · m^{-2} · a^{-1})。

1) 顶部树叶净初级生产力的计算可表达为：

$$\Pi_1=P_1-R_{d,1}-R_{P,1}$$

式中，$R_{P,1}$ 为顶部非树叶植物呼吸作用率

2) 植被净初级生产力与顶部树叶净初级生产力的关系可表达为：

$$\Pi=f_{par}\Pi_1$$

式中，$f_{par}=\dfrac{1-e^{-kL}}{k}$，$k$ 通常取 0.5。

3) 土壤呼吸作用率 R_S:

$$R_S=k_S C_S 2.0^{0.1(T-298.15)}$$

式中，k_S=0.315(a^{-1})；T 为温度。

Lotka-Volterra 模型

Svirezhev Y：Lotka-Volterra 模型与全球植被模式. Ecological Modelling, 2000, 135

(1) 现存生物量一般动力学方程：

$$\frac{dB}{dt}=P-m_R B$$

式中，B 为现存生物量；P 是净生产率；$\tau_R=1/m_R$ 是碳在生物量中实际停留时间；一般来说，$P=P(T, W_s, I, C, \cdots)$，其中 T 是时间，W_s 是土壤含水量，I 是光照，C 是大气中碳浓度。

$$m_R=m+G(B,B_s)$$

式中，B_s 为其他竞争物种的生物量；$\tau=1/m$ 可理解为某一物种的平均生理寿命。

(2) 包含 n 个物种的全球植被模式的一般动力学

方程：

$$\frac{\partial B_i}{\partial t}=P_i(B_i;T,H)-m_i^R B_i \quad (i=1,\cdots,n)$$

式中，T 和 H 是这一空间位置的年平均温度和年降水量；净初级生产力 $P_i(B_i;T,H)=g_i(T,H)B_i$；$m_i^R=m_i+\sum_j^n \gamma_{ij}B_j$，$m_i$ 为第 i 类物种的平均生理寿命。

假设竞争系数是空间无关的，即 $\gamma_{ij}=const._{ij}$，便可得到标准的 Lotka–Volterra 模型：

$$\frac{\partial B_i}{\partial t}=B_i[g_i(T,H)-m_i-\sum_{j=1}^n \gamma_{ij}B_j],\quad (i=1,\cdots,n)$$

(3) 一维二物种模型：

$$\frac{\partial B_1}{\partial t}=B_1\left[\varepsilon_1(x)-\gamma_{11}B_1-\lambda_{12}B_2\right]$$

$$\frac{\partial B_2}{\partial t}=B_2\left[\varepsilon_2(x)-\gamma_{21}B_1-\lambda_{22}B_2\right]$$

式中，$\varepsilon_i(x)=g_i(x)-m_i$。

碳的渐进转换公式

Minnen J G V, Leemans R, Ihle F：在全球变化模型中引入生态系统对模拟的碳循环动力学的瞬时反应的重要性的确定　Global Change Biology, 2000,6

$$P_{ngg}=P_{npini,g,o}+\frac{aT_{tr}e^{-t/w}}{w}+(P_{npini,g,n}-P_{npini,g,o})\left[1-e^{-(-5t/T_{tr})^m}\right]$$

式中，P_{ng}、$P_{npini,g,o}$ 和 $P_{npini,g,n}$ 分别是在栅格'g'中的实际 P_{np}、原来生物量的初始 P_{np} 和新生物量的初始 P_{np}(t C ha^{-1} y^{-1})；T_{tr} 是预设的总的转换时间(y)，t 是从转换开始到现在的时间 (y)；a，w，m 是校准参数；上式的第二部分是描述了原来生物量'B'的衰退，第三部分描述了新的生物量'A'的形成及生长。

碳同位素影响的分析模型

Beerling D J：陆地生物圈在全新世碳循环动力学中的角色　Global Ecology and Biogeography, 2000, 9

$$\delta_a'=\frac{\delta_a m_a+\delta_b m_b}{m_a-m_b}$$

式中，δ_a' 是陆地碳释放改变大气层中二氧化碳同位素比例的潜力；δ_a 是大气层中二氧化碳同位素的比例；δ_b 是植物组织中稳定的碳同位素比例；m_a 是大气层中二氧化碳的质量；m_b 是从植物和土壤中释放的二氧化碳的质量

冰川粒雪中环境季节变化记录分析模型

侯书贵，秦大河，任贾文：希夏邦马峰冰川粒雪中环境季节变化记录研究　地理学报，2000，55(1)

(1) 经验正交函数(*EOF*)：

$$X_{ij}=\sum_{h=1}^{H}T_{ih}x_{hj}$$

$$(i=1,2,\cdots,m;\ j=1,2,\cdots,m;\ h=1,2,\cdots,H)$$

式中，T_{ih} 为正交时间函数；x_{hj} 为正交空间函数。

(2) 降水对稳定同位素含量的影响模型：

$$\delta_p \approx f^{\alpha-1}$$

式中，δ_p 为降水中稳定同位素比率；α为稳定同位素分馏系数；f 为水汽凝结率；$f=q(t)/q_{ini}$ ($q(t)$为当前的水汽混合比，q_{ini} 为水汽来源地的水汽混合比)。

森林与草地的净第一生产力模型

Daly C, Bachelet D, Lenihan J M et al：全球变化研究中树与气体交互作用的动态过程模拟　Ecological Applications, 2000, 10(2)

(1) 对森林来说，总的生产力 P_t 可用下式计算：

$$P_t=P_{tg}k_t k_m k_l$$

式中，P_{tg} 是树木的总产量；k_t 和 k_m 分别表示土壤温度和湿度在生长过程中的影响系数；k_l 是联系地面木材产量与叶面积指数的系数。

(2) 对草地来说，总的生产力 P_g 可用下式计算：

$$P_g=P_{gg}k_t k_m k_b k_s$$

式中，P_{gg} 是指总的产草量；k_b 表示生长过程中活体生物量与死亡生物量的比率的影响系数；k_s 表示树阴的影响系数。

(3) 土壤湿度的产出系数可定义为：

$$k_m=(M_s+M_p)/P_{ET}$$

式中，M_s 是指土壤剖面中可利用的水；M_p 是月降雨量；P_{ET} 潜在的土壤不分蒸发蒸腾损失总量。

方解石的溶解与沉淀的计算公式

宋保平，张先林，方正等：长江河口地区第四系地下水化学演化机制　地理学报，2000，55(2)

$[C_a^{2+}]$ 与 $[CO_3^{2-}]$ 的饱和指数(*SI*)：

$$SI_c = \lg \frac{IAP_c}{K_c} = \lg IAP_c - \lg K_c$$

式中，K_c 为方解石的溶度积；IAP_c 为离子活度积，($IAP_c = [C_i^{2+}]\cdot[CO_3^{2-}]$)；当 $SI_c>0$，方解石沉淀；当 $SI_c=0$，方解石溶解反应达到平衡；当 $SI_c<0$，方解石溶解。

冰川槽谷的横剖面梯级宽深比模型

李英奎，刘耕年：冰川槽谷横剖面沿程变化及其对冰川动力的反映．地理学报，2000，55(2)

$$f = md^n$$

式中 f 为梯级宽深比，d 为槽谷深度。

各对地块在分类学构成上的相异性

Price M V, Waser N M：亚高山草甸对四年人工增暖的反应．Ecological Applications，2000，10(3)

$$D_{VEG\,jk} = \sqrt{\sum (Q_{FRE\,ij} - Q_{FRE\,ik})^2}$$

式中，D_{VEG} 代表植被距离；j 和 k 是地块的标号；$Q_{FRE\,ij}$ 是调查期间地块 j 中 i 类发生的总频率。

净氮矿化参数分析模型

Epstein H E, Walker M D, Chapin E S et al：北极植物群落对气候变暖反应的一个短暂的、基于营养的模型．Ecological Applications，2000，10(3)

在一个有稳定生物量的、氮有限的生态系统中：

可利用的氮=总生物量× 衰老比例/生物量中氮的比例

式中，氮衰老比例和生物量中氮的比例是植物群落的平均数。

全球大气信息模型

Prentice I C, Heimann M, Sitch S：陆地生物圈的碳平衡：生态系统模型与大气观测．Ecological Application，2000，10(6)

(1) 二氧化碳：

$$dC_a / dt = Q_f - (S_o - S_b)$$

式中，C_a 是大气 CO_2 中碳的量；Q_f 指由于化石燃料的燃烧对空气增加的碳通量；S_o 是指海洋吸入的碳；S_b 是指陆地生物圈碳的净平衡(吸入减去释放)。

(2) 氧：

$$dO_a / dt \approx -1.4Q_f + 1.1S_b$$

$$S_b \approx (1.4Q_f + dO_a / dt)/1.1$$

式中，O_a 是指空气中的氧气含量。

热带地区萨瓦那草原－森林的滞后作用模型

Sternberg L D S L：热带地区萨瓦那草原－森林的滞后作用．Global Ecology and Biogeography，2001，10

(1) 具有它们各自对森林成长所需最小干季降水量的单元的频率：

$$f(p) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-1/2\left(\frac{p-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

式中，p 是一个单元中森林秧苗成长所需的最小干季降水量；σ 是标准差；μ 是本地区一个单元中森林生长的平均最小干季降水量。

(2) 一个地区相对的森林覆盖度(A)：

$$A = \int_0^P f(p)\mathrm{d}p$$

式中，P 是平均干季降水量。

(3) 一个地区的总干季降水量，包括植物的贡献，表示为：

$$g(A) = P = P_{imp} + A\phi_f + (1-A)\phi_s$$

式中，P 和 P_{imp} 分别是总的和输入的干季降水量；ϕ_f 和 ϕ_s 分别表示森林和萨瓦那草原蒸发蒸腾作用贡献的干季降水量。

(4) 森林和萨瓦那草原产生的干季降水量的计算可表达为：

$$\phi = Ed\alpha$$

式中，E 是森林和萨瓦那草原每天的干季水分蒸发蒸腾损失总量；d 是干季的天数；α 是降落下来的蒸发蒸腾水蒸气的比例。

(5) 假设一个森林面积为 Ai 的地区遭受全球的气候变化，给本地区带来的总降水量为 P_o：

$$P_o = P_{imp} + \phi_s + Ai(\phi_f - \phi_s)$$

这将引起的森林面积的变化，即 $F: P \to A$，可以概括为：$A_{n+1} = F(g(A_n))$。

盐化草甸植被净初级生产力模型

张宏：极端干旱气候下盐化草甸植被净初级生产力对全球变化的响应．自然资源学报，2001，16(3)

$$Y = 0.0324 + 0.0037E_0(1 - h/h_0)^2 \quad (1)$$

式中，Y 化草甸植被净初级生产力 ($t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$)；$E_0$

为可能蒸散(mm)；h 为地下水埋深(m)；地下水蒸发的极限深度(m)。

对模型(1)进行关于底下水埋深 h 变化的灵敏度分析，以检验盐化草甸植被 NPP 对地下水埋深变化的反应。设 S_h 为灵敏度指数，则：

$$S_h = \left|\frac{dY}{dh}\cdot\frac{h}{Y}\right| = \left|-\frac{2h\times 0.0037E_0(1-h/h_0)/h_0}{0.0324+0.0037E_0(1-h/h_0)^2}\right| \approx \frac{2h}{h_0-h} \tag{2}$$

计算可能蒸散 E_0 的公式：

$$E_0 = \frac{\Delta R_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \tag{3}$$

式中，

$$R_n = Qs[1+0.098(\lg Z-2)]\times (0.202-0.643n/N')(1-a) - S\delta T_k^4 \times (0.39-0.058\sqrt{e_d})(0.1+0.9n/N)$$

$$E_a = 0.16(1+0.41V)(e_a-e_d)$$

$$\Delta = \frac{e_a}{273+T_a}\left(\frac{6463}{273+T_a}-3.927\right)$$

式中，Q_s 为晴天总辐射(mm·d^{-1})；Δ 为气温为 T_a 时的饱和水汽压曲线斜率 hPa·℃$^{-1}$；δT_k^4 为气温为 T_a 时的黑体辐射；S 为地表对长波辐射的吸收率；γ：干湿球温度表常数；R_n 为净辐射；E_a 为空气干燥项，与风速和空气饱和差有关；e_a 为温度为 T_a 时的空气饱和水汽压(mm)；e_d 为温度为 T_a 时的平均水汽压(mm)；n/N 为日照百分率；n/N' 为实际日照百分率，$N'=N-1$；α 为下垫面反射率；V: 地表风速(m·s^{-1})；Z 为海拔高度；P 为海拔高度为 Z 时的气压(hPa)。

全球变化造成的气温升高，将使地表的能量收支平衡发生变化，由于 R_n 是计算可能蒸散的关键项，因此它的变化将影响到 E_0。设：

$$R_n = Q(1-\alpha) - I \tag{4}$$

式中，Q 为总辐射；α 为地表反射率；I 为长波有效辐射。

如果考虑到温度升高对 I 的影响，而对空气干燥的影响则是改变空气饱和水汽压，则有：

$$\Delta I = S\delta T_{ka}^4 - S\delta T_{k0}^4 = 4S\delta T_k^3(T_{ka}-T_{k0}) \tag{5}$$

$$\Delta R_n = -S\delta T_k^3 \Delta T_k \tag{6}$$

$$\Delta E_a = F(V)\times\Delta(e_a-e_0) = F(V)(e_{aa}-e_{a0}) \tag{7}$$

同理：

$$\Delta = \frac{e_{aa}-e_{a0}}{273+\Delta T_k}\,\frac{6463}{273+\Delta T_k-3.927} \tag{8}$$

将(5)~(8)式代入(3)，便可求出全球变化造成温度升高后可能蒸散 E_0 的改变量 ΔE_0，从而可得：

$$E_{0a} = E_0 + \Delta E_0 \tag{9}$$

式中，E_{0a} 为全球变化后的可能蒸散(mm)。

大气植被相互作用模式

李银鹏：全球陆地生态系统与大气之间碳交换的模拟研究．地理学报，2001，56(4)

(1) AVIM 主要包括物理交换子模块和植物生长子模块和物理参数转换子模块：

单位面积最佳环境条件下的最大光合速率：

$$P_{max} = \frac{A}{K}\ln\frac{A+BI_0}{A+BI^{-kI_a}} \tag{1}$$

式中，A 为饱和光合速率；B 为光反映曲线斜率；I_0 为冠顶光合有效辐射；k 为叶从消光系数；I_a 为叶面积指数。

(2) 植物的光合作用受到温度，土壤水分和叶氮浓度等环境条件的限制：

$$GP = P_{max}f(T_f)f(\Psi)f(N) \tag{2}$$

$$f(T_f) = \frac{(T_f-T_{min})(T_f-T_{max})}{(T_{min}-T_{opt})(T_{max}-T_{opt})} \tag{3}$$

$$\begin{cases} f(\Psi) = 1-e^{-b(\omega-\omega_i)} & (\omega > \omega_i) \\ f(\Psi) = 0 & (\omega < \omega_i) \end{cases} \tag{4}$$

式中，T_f 为叶面温度；T_{min}、T_{opt} 和 T_{max} 分别为最低、最适和最高光合温度；ω 为土壤含水量；ω_i 为土壤萎蔫含水量，b 为参数。

这里暂不考虑叶氮浓度对光合作用的影响，令 $f(N)=1$ 植物的呼吸作用包括维持呼吸和生长呼吸，维持呼吸是温度的函数，而生长呼吸正比与干物质增长率，有如下形式：

$$R_m = \sum \alpha_i M_i Q^{0.1(T-T_0)} \quad (i=f,s,r) \tag{5}$$

$$\begin{cases} R_g = \sum \sigma_i \eta_i N_P & (N_P > 0 \quad i = f, s, r) \\ R_g = 0 & (N_P < 0) \\ \sum \eta_i = 1 \end{cases} \tag{6}$$

式中，R_m 为维持呼吸量；α_i 为呼吸系数；M_i 为生物量；Q 为呼吸常数(2 左右)；T_0 为参考温度；T 为叶面或土壤温度；R_g 为生长呼吸量；σ_i 为生长呼吸系数；η_i 为分配系数；$N_P=G_P-R_m$；下标 f，s，r 分别表示叶、茎和根的值。

(3) 植物总生物量的变化是光合同化产物减去呼吸、凋落之差，如下式：

$$\frac{dM}{dt} = G_P - R_m - R_g - F_{al} \tag{7}$$

式中，M 为单位面积总生物量；F_{al} 为凋落率与生物量成正比。

综合以上所述，各组织的生物量变化方程为：

$$\frac{dM_f}{dt} = (1-\sigma_f)\eta_f(GP - R_m) - F_{af} \tag{8}$$

$$\frac{dM_s}{dt} = (1-\sigma_s)\eta_s(GP - R_m) - F_{as} \tag{9}$$

$$\frac{dM_r}{dt} = (1-\sigma_r)\eta_r(GP - R_m) - F_{ar} \tag{10}$$

式中，M_f，M_s，M_r 分别为植物叶、茎和根的生物量；F_{af}，F_{as}，F_{ar} 分别为植物叶、茎和根的凋落量；其他符号如前。

由叶生物量变化可知叶面积指数，从而求得光合速率，由叶、茎、根生物量计算呼吸速率。所以植物的净初级生产力(P_{np})可以求得：

$$P_{np} = G_P - R_m - R_g \tag{11}$$

此计算公式可表示一个随季节变化的陆地生态系统与大气之间的碳交换的动态过程。

第二十五章 生物多样性

多样性指数 D

Waloff N, Solomon M G：酸土草原的叶蝉 Journal of Applied Ecology, 1973, 10(1)

$$D=\frac{1}{N}\log_2\frac{N!}{N_1!N_2!N_3!\cdots N_x!}$$

式中，$N_1,\cdots,N_x$ 是物种 1,2,…的个体数量；N 是群落中的个体总数。

物种多样性计算公式

King K L, Hutchinson K J, Greenslade P：播种的牧场上绵羊数量对跳虫群落的影响 Journal of Applied Ecology, 1976, 13

Brillouin 指数被用来计算物种多样性：

$$H=\frac{1}{N}(\log_2 N!-\sum_{i=1}^{S}\log_2 N_i!)$$

式中，N 是动物的总数；N_i 是物种 i 的数量；S 是物种丰富度。

等级多样性指数

Osborne L L, Davies R W, Linton K J：等级多样性指数在激流群落分析中的应用 Journal of Applied Ecology, 1980, 17

(1) Shannon-Weaver 物种多样性指数：

$$H'=-\sum_{i=1}^{s}p_i\ln p_i$$

式中，p_i 是群落的第 i 物种中个体的数量。

(2) 等级多样性指数(I_{hd})：

$$I_{hd}=H'(F)+H'_F(G)+H'_{FG}(S)$$

式中，$H'(F)$ 是总多样性的家族组分；$H'_F(G)$ 是总多样性的种属组分；$H'_{FG}(S)$ 是总多样性的物种组分

(3) 基于营养关系的等级多样性指数(I_{htd})：

$$I_{htd}=H'(T_1)+H'_{T1}(T_2)+H'_{T1T2}(T_3)$$

式中，$H'(T_1)$ 是总热带多样性中一般营养水平的组分；$H'_{T1}(T_2)$ 是总热带多样性中功能性的热带组分；$H'_{T1T2}(T_3)$ 是总热带多样性的最低分类学单元组分。

物种多样性指数 S

Prestidge R A：氮肥对草原头喙亚目(同翅类昆虫)的影响 The Journal of Applied Ecology, 1982,19

$$S=\ln\left(1+\frac{N}{\alpha}\right)$$

式中，S 是物资数量；N 是个体总数；α 是能从列线图中方便读出的多样性指数。

对于小样本，α 不可能从列线图中精确的读出，Margalef (1958)提出一个对于小样本同样精确的指数：

$$\alpha_1=\frac{S-1}{\ln N}$$

多样性指数

罗志义：上海佘山地区棉田节肢动物群落多样性分析及杀虫剂对多样性的影响. 生态学报，1982，2(3)

(1) Shannon-Wiener 多样性指数模型：

$$H=-\sum p_i\ln p_i$$

式中，p_i 为第 i 个种个体占总数的比例。

(2) Simpson 多样性指数模型：

$$D=\frac{N(N-1)}{\sum n_i(n_i-1)}$$

式中，N 为所有种类总个体数；n_i 为第 i 个种的个体数。

(3) 均匀度模型：

$$V'=\frac{H'-H'_{min}}{H'_{max}-H'_{min}}$$

式中，H' 为实测多样性；H'_{min}，H'_{max} 分别为最小和最大多样性值。

物种多样性指数 H'

钱国桢，王培潮，祝龙彪等：二十年来天目山鸟类群落结构变化趋势的初步分析 生态学报，1983，3(3)

$$H'=-\sum_{i=1}^{S}P_i\log_2 P_i$$

或

$$H'=3.3219(\lg N-\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{S}n_i\lg n_i)$$

式中，S 为种的成分(数目)；P_i 为第 i 种的个体数与所有种个体总数的比例；N 为所有种的个体总数；n_i 为第 i 种的个体数。

群落多样性指数

杨兴家：长白山北坡鸫属鸟类群落结构的研究　生态学报，1983，3(4)

(1) 属内种的多样性指数 $H'_j(S)$ 模型：

$$H'_j(S) = -\sum_{k=1}^{S_j} q_{jk} \lg q_{jk}$$

式中，S_j 为群落内的种数；q_{jk} 为群落中第 K 种个体数占总个体数的比例。

(2) 均匀性指数 j' 模型：

$$j' = H'/H'_{\max}$$

式中，$H'_{\max}$ 为 H' 的最大理论值。

物种丰富度的计算模型

Dony J G, Denholm I：评估生态相似生境的保护价值的一些定量方法　The Journal of Applied Ecology, 1985, 22

(1) 生境中物种总数的变化范围是从 43 到 158，平均值是每片树林有 83 个物种，与生境面积是正相关的，两个线性模型：

$$S = \lg c + z \lg A$$

$$\lg S = \lg c + z \lg A$$

式中，S 是物种数量；A 是面积；c 和 z 是适宜性常数。

(2) Arrhenius (1921)幂函数：

$$S = cA^z$$

(3) 被选择物种的数量：

当前被选择物种的数量也依赖于面积，更大的树林应该有更多的物种，模型为：

$$\lg(R+1) = \lg c + b \lg A$$

式中，R 是被选择物种与总物种的比值。

(4) 植物稀有因子(PRF)：

$$\lg \mathrm{PRF} = \lg c + b \lg A$$

生态系统多样性指数

Goda T, Matsuoka Y：一个广泛的湖泊模型的综合分析——生态系统多样性的估算　Ecological Modelling, 1986, 31

(1) 多样性指数：

$$\mathrm{DI}_{\mathrm{mass}} = -\sum_{i=1}^{k} \frac{b_i}{B} \log_2 \frac{b_i}{B}$$

式中，b_i 是第 i 物种的生物量；B 是群落的总生物量，k 是群落中的物种数量。

(2) 修正后的 $\mathrm{DI}_{\mathrm{mass}}$：

$$\mathrm{DI}'_{\mathrm{mass}} = -\sum_{i=1}^{k} b_i \log_2 \frac{b_i}{B}$$

种的多样性模型

林鹏，丘喜昭：福建三明瓦坑的赤枝栲林　植物生态学与地植物学学报，1986，10(4)

(1) 多样性指数 D 模型：

$$D = 3.3219\left(\lg n - \frac{1}{N}\sum n_i \lg n_i\right)$$

式中，N 为乔、灌木种的总个体数；n_i 为第 i 个种的个体数。

(2) 均匀度 J 模型：

$$J = \frac{(S-\beta)(\alpha-1)\alpha + \beta(\alpha+1)\alpha}{\sum n_i(n_i-1)}$$

式中，β 为 N 被 S(种数)整除后的余数部分，$0 \leqslant \beta < N$；$\alpha = \dfrac{N-\beta}{S}$。

群落多样性模型

金翠霞，吴亚：群落生态学与有害生物防治(四)：群落演替与群落多样性　生态学杂志，1987，6(3)

(1) Simpson 指数 D 模型：

$$D = \frac{N(N-1)}{\sum n_i(n_i-1)}$$

式中，N 为群落总个体数；n_i 为第 i 个种个体数。

(2) 多样性指数 H' 模型：

$$H' = -\sum P_i \lg P_i$$

式中，P_i 为第 i 种的个体数占群落总个体数的比率。

(3) 群落的均匀性 J 模型：

$$J = \frac{H'}{H'_{\max}}$$

式中，$H'_{\max}$ 为最大多样性指数值。

(4) 群落种类数(即丰富度)S模型：

$$\lg S = \frac{H'}{H'_{\max}}$$

生态的多样性度量模型

李典谟：生态的多样性度量 生态学杂志，1987，6(4)

(1) 一个种有 r 个个体的概率 P'_r(负二项分布)模型：

$$P'_r = C\frac{\Gamma(k+r)}{r!}X^r$$

$$C = \frac{(1-X)^k}{[1-(1-X)^k]}\frac{1}{\Gamma(k)}$$

(2) 多样性的信息度量：

1) 无限总体的多样性指数模型：

$$H(p_1, p_2, \cdots, p_s) = -c\sum_i p_i \lg p_i$$

式中，c 为正常数。

2) 有限总体的多样性指数模型：

$$H = \frac{1}{N}\lg\frac{N!}{N_1!N_2!\cdots N_i!}$$

式中，N_i 为每个种 i 中的个体数；N 为总体中的个体数。

(3) 其他的多样性指数：

1) Hendrickson 多样性指数模型：

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left[N_i\left(\sum_{j=1}^{n}N_j x_{ij}\right)\right]}{N(N-1)}$$

式中，当 $i=j$ 时，$x_{ij}=0$；当 $i \neq j$ 时，$x_{ij}=1$。

2) McIntosh 多样性指数模型：

$$D = \frac{N-U}{N-\sqrt{N}}$$

式中，$U = \left(\sum_{i=1}^{n}N_i^2\right)^{1/2}$ 为点和坐标原点的距离。

多样性指数与均匀度模型

郭玲，许再富：西双版纳热带季节雨林植物种类多样性的一种研究方法. 生态学杂志，1990，9(5)

(1) 多样性指数 D 模型：

$$D = -\sum p_i \log_2 p_i$$

或

$$D = 3.3219\left(\lg N - \frac{1}{N}\sum n_i p_i\right)$$

(2) 均匀度 J 模型：

$$J = (D/3.3219)\left[\lg N - \frac{\alpha(s-\beta)\lg\alpha + \beta(\alpha+1)\lg(\alpha+1)}{N}\right]$$

式中，N 为样地中所有种的总个体数；n_i 为第 i 种的个体数；S 为样地中的总种数；β 为 N 被 S 整除以后的余数；$\alpha = (N-\beta)/S$。

森林退化和多样性的宏观最小化模型

Kangas P：森林退化和多样性的宏观最小化模型 Ecological Modelling. 1991. 57

(1) 种群驱动力模型：

$$dP/dt = k_1P - k_2P$$

$$dF/dt = -k_3PF$$

$$dC/dt = k_3PF$$

$$dD/dt = -k_5P$$

式中，P 是森林开发较小的地区的种群；F 是森林的土地面积；C 是砍伐了的土地面积；D 是物种多样性；k_1 是种群的出生率；k_2 是种群的死亡率；k_3 是森林退化率；k_5 是物种灭绝率。

包含了 Logistic 增长的种群驱动力模型：

$$dP/dt = k_1P - k_2PP$$

包含了物种灭绝率的种群驱动力模型：

$$dD/dt = -k_5D$$

(2) 单元物种的面积模型：

$$D = KFZ$$

$$dF/dt = -k_3EF$$

$$dC/dt = k_3EF$$

式中，E 是森林退化的能量来源；K 是系数；Z 是物种面积曲线中的指数值。

物种丰富度动态模型

Wu J. Vankat J L.：基于地域的森林岛屿物种丰富度动力学模型 Ecological Modelling. 1991. 58

(1) 总丰富度(R_t)是内部物种丰富度(R_i) 和边缘

物种丰富度(R_e)的总和，即：

$$R_t = R_i + R_e$$

(2) 内部和边缘物种丰富度的瞬时动力学：

$$\frac{dR_i}{dt} = f_i(A_i)g_i(A_t)h(t)$$

$$\frac{dR_e}{dt} = f_e(A_e)g_e(A_t)h(t)$$

式中，A_t，A_i 和 A_e 分别是森林岛屿的全部、内部和边缘地区。

$$\frac{dR_i}{dA_i} = f_i(A_i)$$

$$\frac{dR_e}{dA_e} = f_e(A_e)$$

$$\frac{dA_i}{dA_t} = g_i(A_t)$$

$$\frac{dA_e}{dA_t} = g_e(A_t)$$

$$\frac{dA_t}{dt} = h(t)$$

(3) 如果动力学系统中包含时间延迟，则：

$$\frac{dR_i}{dt} = f_i[A_i(t-T)]g_i[A_t(t-T)]h(t-T)$$

$$\frac{dR_e}{dt} = f_e[A_e(t-T)]g_e[A_t(t-T)]h(t-T)$$

式中，T 表示改变地域之后物种丰富度变化的延迟时间。

生态系统的结构多样性模型

Zhou J, Ma S, Chen C：一个生态系统多样性指数。Ecological Modelling, 1991, 59

(1) 假定生态系统的成分由集合 $X=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$ 来描述，x_j 是生态系统的第 j 个成分；假定一个二元关系集合为 $R=\{r^{(1)},r^{(2)},\cdots,r^{(m)}\}$，该集合中任何两个成分之间都是倒数关系，式中 $r^{(i)}$ 是第 i 个二元关系；$a_{jl}^{(i)}$ 是 x_j 和 x_l 之间第 i 个二元关系的相互作用的强度。

(2) 生态系统结构多样性 $H(X,R)$ 为：

$$H(X,R) = -\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\frac{b_j^{(i)}}{Z^{(i)}}\lg\frac{b_j^{(i)}}{Z^{(i)}}$$

$$b_j^{(i)} = \sum_{\substack{l=1\\ l\neq j}}^{n} a_{jl}^{(i)}$$

$$Z^{(i)} = \sum_{j=1}^{n} b_j^{(i)}$$

常用中心式聚类最小码模式

高琼：最小码原理在分级式和非分级式多元聚类分析中的应用．生态学报，1991，11(4)

(1) 概率模型：

设具有 m 个数性变量的 n 个个体在 C 个聚类中心附近做 m 维正态分布，计个体向量 $\{x_i\}=x_{ik}$，$k=1,2,\cdots,m, 1\leqslant i\leqslant n$，以及聚类中心向量为 $\{V_j\}=V_{jk}$，$k=1,2,\cdots,m, 1\leqslant j\leqslant c$。若各属性变量相互独立，且 x_{ik} 和 V_{jk} 只能以有限位二进制码来表示，则以 $\{V_j\}$ 为中心，$\{x_j\}$ 出现的概率模型为：

$$P(x_i|H_c,V_j) = \frac{\Delta V}{A}\exp\left[-\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{m}\frac{(x_{ik}-V_{jk})^2}{2\delta_k^2}\right]$$

式中，H_c 为给定 C 类的这一模型；$P(x_iH_c,V_j)$ 为给定 H_c 和 $\{V_j\}\{x_j\}$ 出现的概率；ΔV 为 m 维空间的微超立方体；δ_k^2 为分布方差；A 为归一化常数。

(2) 误差码长模型：

$$E_1 = \frac{1}{2}\log_2 e\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{c}\delta_{ij}\sum_{k=1}^{m}\left[(x_{ik}-V_{jk})^2/\delta_k^2\right]+B_2$$

式中，E_1 为误差码长；如果个体 i 被分到第 j 类，δ_{ij} 为 1，否则为 0；B_2 为常数。

(3) 模型码长模型：

$$M_1 = N_b(C+S)m + 2N_aS$$

式中，M_1 为模型码长；N_b 决定了聚类中心的精度，它越大，V_{jk} 的精度就越高，模型的编码就越长；C 为端点数；S 为节点数；N_a 为计算机用来表示一个地址的码长。

(4) 总码长模型：

$$D_1 = E_1 + M_1$$

显然，E_1 会随 C 的增加而下降，因为随着聚类类别数的增加，个体与聚类中心的距离会下降，但 M_1 的

值则随 C 和 S 直线上升。在 C 和 S 的取值区间，必有一最佳的 C，S 组合，使得总码 D_1 最小，其对应的模型结构就是我们要求的最小码优化模型。

浮游生物生产量及多样性模型

赵玉宝：鲢鱼种和鳊鳙对池塘浮游生物的影响 生态学报，1993，13(4)

(1) 轮虫生产量模型：

a：时代时间法：

$$P = N\overline{W}/\overline{T}$$

b：指数增长法：

$$P = \left(No \cdot e^{bT} - No\right)\overline{W}$$

式中，P 为轮虫日生产量；N 为每平方米轮虫的个数；$\overline{W}$ 为个体平均体重；$\overline{T}$ 为世代时间；$b = \ln(1+B)$，$B = E/No \cdot D$，D 为卵发育时间，E 为每平方米卵的数量；No 为每平方米轮虫的数量；T 为采样间隔。

(2) 甲壳类生产量模型：

积累增长法：

$$P = N_1 \Delta\overline{W_1}/T_1 + N_2 \Delta\overline{W_2}/T_2 + N_3 \Delta\overline{W_3}/T_3 + \cdots$$

式中，P 为甲壳类日生产量；$N_1, N_2, N_3, \cdots$ 为不同发育阶段的个体数；$\Delta\overline{W_1}, \Delta\overline{W_2}, \Delta\overline{W_3}, \cdots$ 为不同发育阶段个体平均增重；$T_1, T_2, T_3, \cdots$ 为不同发育阶段的发育时间。

(3) 浮游生物多样性指数的计算公式：

浮游生物多样性指数模型：

$$d = S - \frac{1}{\ln N}$$

式中，d 为浮游植物或浮游动物的多样性指数；S 为浮游植物或浮游动物的种数；N 为每升水中浮游植物或浮游动物的个数。

物种多样性的热力学模型

Fränzle O：热带和亚热带植物群落中物种多样性的热力学方面 Ecological Modelling, 1994, 75/76

(1) 熵产生：

$$dS = d_iS + d_eS$$

式中，dS 是生态系统的熵产生；d_iS 表示系统内的熵产生；d_eS 是描述熵输出到外部环境的流量术语。

(2) d_iS 可以用热力学术语“力”来表达 X_i，J_i 是不可逆现象的比率，则有：

$$\frac{d_iS}{dt} = \sum_{i=1}^{n} J_i X_i$$

(3) 在平衡态附近，流量和力之间有一个线性关系：

$$J_i = \sum_{j=1}^{m} L_{ij} X_j$$

式中，L_{ij} 是物种系数。

蝗虫种的多样性与均匀性指数

康乐：放牧干扰下的蝗虫-植物相互作用关系 生态学报，1995，15(1)

(1) 蝗虫种的多样性 H' 和均匀性 e 指数模型：

$$H' = -\sum_{i}^{s} P_i \ln P_i$$

$$e = \frac{H'}{\ln S}$$

式中，P_i 为蝗虫种群在放牧 i 地段的能值占该地段蝗虫总能值的比例；S 为该地段蝗虫物种数。

(2) 相关系数 $r(i,k)$ 模型：

$$r(i,k) = \frac{\sum Y_{ij} Y_{kj}}{\sqrt{\sum Y_{ij}^2 \sum Y_{kj}^2}}$$

式中，Y_{ij} 为物种 i 在 j 地段的相对丰盛度；Y_{kj} 为物种 k 在 j 地段的相对丰盛度。

生物区室中的多样性

Aoki I：生物区室中多样性和丰富度的关系 Ecological Modelling, 1995, 82

Simpson 的多样性指数 D 的计算：

$$D = \left(\sum_{i=1}^{s} p_i^2\right)^{-1}$$

式中，$p_i = n_i / \sum_{i=1}^{s} n_i$，$n_i$ 是生态系统的第 i 生物区室中的标准产量；s 是生态系统中生物区室的数量。

两个农场之间物种的相似性指数

Perfecto I, Snelling R：生物多样性和热带农业生态系统的变化——咖啡种植园中的蚂蚁，Ecological Applications, 1995, 5(4)

$$I = s_{ij} / (s_i + s_j - s_{ij})$$

式中，s_i 和 s_j 分别是农场 i 和 j 中发现的物种数量；s_{ij} 是在两个农场中都发现的物种数量。

扰动和多样性-密度效应模型

Denslow J S：热带雨林中的扰动和多样性-密度效应 Ecological Applications, 1995, 5(4)

在包含 n 个个体的样本中，物种的预期数量 $S(n)$ 的计算公式为：

$$S(n)=\frac{S_{\max}n}{B+n}$$

式中，$S_{\max}$ 是物种的估计总数；B 是合适的常数；n 是样本中的个体数量；$S(n)$ 是样本中的物种数量。

景观格局多样性模型

傅伯杰：景观多样性分析及其制图研究 生态学报，1995，15(4)

(1) 聚集度 RC 模型：

$$RC=1-C/C_{\max}$$

$$C=-\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}P_{ij}\lg P_{ij}$$

$$C_{\max}=2m\lg m$$

式中，RC 为相对聚集度；C 为复杂性指数；$C_{\max}$ 为 C 的最大可能取值；P_{ij} 为景观类型 i 与景观类型 j 相邻的概率；m 为景观中景观类型的总数。

(2) 修改的分维数 D_m 模型：

$$D_m=2\lg(P_m/4)/\lg A$$

$$P_m=P+2(A-1)n/(m-1)$$

式中，P 为斑块的周长；A 为斑块的面积；m 为景观中景观类型的总数；n 为与斑块相邻的景观类型的数目。

(3) 景观破碎度 F 模型：

$$F=[(m-1)/E]\times 100\%$$

式中，m 为被测景观中斑块的总数目；E 为被测景观中可能出现的最多斑块数。

(4) 景观多样性指数 D_i 模型：

$$D_i=[(i-1)/(m-1)]\times 100\%$$

式中，i 为以某一栅格为中心的周围邻域中景观类型的数目；m 为制图区域内景观类型的总数。

景观多样性指数

Roberts D W：使用关键属性和模糊系统理论的景观植被模型。Ecological Modelling, 1996, 90

(1) 地块多样性 D 可表达为：

$$D=\frac{\sum_{i=1}^{P}-a_{p_i}\lg a_{p_i}}{\sum_{j=1}^{Q}-a_{qj}\lg a_{qj}}$$

式中，a_{p_i} 是总地块 P 中的地块 i 的总景观部分；a_{qj} 是 Q 多边形中第 j 多边形的面积。地块多样性对地块的数目和地块大小的相对平均值比较敏感。

(2) γ-多样性是一个多样性景观指数，它把个体多边形中的 α-多样性和多边形中的模糊共同体类型变量综合在一起。γ-多样性 D_γ 计算如下：

$$D_\gamma=\sum_{k=1}^{m}(-x_k)\lg x_k$$

式中，$x_k=\sum_{j=1}^{Q}a_{q_j}\mu_k(q_j)$，$\mu_k(q_j)$ 是在共同体类型 k 中多边形 q_j 的模糊成员。

树种丰富度

Roberts D W：使用关键属性和模糊系统理论模拟森林动力学。Ecological Modelling, 1996, 90

树种丰富度被计算为目前各年龄类别的总和：

$$\alpha_i=\sum_{j=1}^{n}p_{i_j}$$

式中，α_i 是树种 i 的丰富度；p_{i_j} 是对于寿命为 n 的树种 i 来说，年龄类别 j 存在或缺乏（0 或 1）。

多种群密度依赖增长模型

Lin C R, Buongiorno J, Vasievich M：使用多种群、密度依赖矩阵增长模型来预测北方阔叶树林分多样性和树种移入。Ecological Modelling, 1996, 91

在下面的注释中：i 指树种；j 指树的大小；t 指一个时间点。t 时刻树木的存量用列向量 $\boldsymbol{y}_t$ 表示，它包含种群向量 $\boldsymbol{y}_{it}=[y_{ijt}]$，这里 y_{ijt} 是收割前单位面积 j（$j=1,2,\cdots,n$）上，种群 i（$i=1,2,\cdots,m$）在 t 时刻存活树木的数量。h_{ijt} 表示单位面积 j（$j=1,2,\cdots,n$）上，种群 i (i=1,2,…,m) 在 t 时刻砍伐树木的数量。由种群向量 $\boldsymbol{h}_{it}=[h_{ijt}]$ 组成的列向量 $\boldsymbol{h}_t$ 表示 t 时刻的收获量。

(1) 整个模型形式如下：

$$\boldsymbol{y}_{t+1}=\boldsymbol{G}_t(\boldsymbol{y}_t-\boldsymbol{h}_t)+\boldsymbol{c}$$

式中，$\boldsymbol{G}_t=\boldsymbol{A}_t+\boldsymbol{R}$，$\boldsymbol{A}_t=\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_{1t} & 0 & \cdots & 0\\ 0 & \boldsymbol{A}_{2t} & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ 0 & 0 & \cdots & \boldsymbol{A}_{mt}\end{bmatrix}$。

对于种群 i，其演变可能性形成了一个 $n\times n$ 矩阵 $\boldsymbol{A}_{it}$：

$$A_{it} = \begin{bmatrix} a_{i1t} & & & & \\ b_{i1t} & a_{i2t} & & & \\ & b_{i2t} & a_{i3t} & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & b_{i,n-1,t} & a_{int} \end{bmatrix}$$

式中，a_{ijt}是面积j上，种群i在t时刻存活树木的比例；b_{ijt}是在t到$t+1$时刻，从地块j移动到$j+1$上的，原先在面积j上，种群i在t时刻存活树木的比例。

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_{11} & \boldsymbol{R}_{12} & \cdots & \boldsymbol{R}_{1m} \\ \boldsymbol{R}_{21} & \boldsymbol{R}_{22} & \cdots & \boldsymbol{R}_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \boldsymbol{R}_{m1} & \boldsymbol{R}_{m2} & \cdots & \boldsymbol{R}_{mm} \end{bmatrix}$$

式中，$\boldsymbol{R}_{ik}$是一个$n\times n$矩阵，代表在种群i的内向生长中，种群k残存森林储积量的影响。

$$\boldsymbol{c} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{c}_1 \\ \boldsymbol{c}_2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{c}_m \end{bmatrix}$$

式中，$\boldsymbol{c}_i$是一个$n\times 1$列向量，代表种群i的林分无关内向生长。

(2) 树木大小的差异被定义为整个种群平均大小差异的加权平均值：

$$H_{\mathrm{size}} = -\sum_{i=1}^{m} \frac{y_i}{y} \sum_{j=1}^{n} \frac{y_{ij}}{y_i} \lg \frac{y_{ij}}{y_i}$$

式中，y_{ij}是在种群i中，地块j上每公顷面积上树木的数量。

植物物种多样性指数

朱志红，王刚：群落结构特性的分析方法探讨——以高寒草甸和高寒灌丛为例．植物生态学报，1996，20(2)

(1) Simpson 多样性指数λ模型：

$$\lambda = \sum_{i=1}^{S} \left[n_i(n_i - 1)/N(N-1) \right]$$

式中，S为植物种数；n_i为第i个种的个体数；N为所有种的个体总数。

(2) Shannon 信息多样性指数H'模型：

$$H' = -\sum_{i=1}^{S} \frac{n_i}{N} \ln \frac{n_i}{N}$$

(3) McIntosh 多样性指数D_{mc}模型：

$$D_{\mathrm{mc}} = \left(N - \sqrt{\sum n_i^2}\right) \Big/ \left(N - \sqrt{N}\right)$$

生物量多样性指数

管东生：火对香港草地和芒萁群落的影响．地理研究，1996，15(3)

$$H = 3.322\left[\lg N - \left(\frac{1}{N}\sum N_i \lg N_i\right)\right]$$

式中，H为多样性指数；N为总地上部生物量；N_i为i种的地上部生物量。

珊瑚物种多样性指数

于登攀，邹仁林：鹿回头岸礁造礁石珊瑚物种多样性的研究．生态学报 1996，16(5)

(1) α-多样性及均匀度：

1) Shannon-Wiener 指数D_{SW}模型：

$$D_{\mathrm{SW}} = -\sum P_i \lg P_i$$

2) 均匀度R_{SW}模型：

$$R_{\mathrm{SW}} = D_{\mathrm{SW}} / \lg S$$

式中，P_i为一个群体属于i种的概率；S为群落包含的种类。

(2) β-多样性：

1) Whittaker 指数β_{W}模型：

$$\beta_{\mathrm{W}} = (S/A) - 1$$

2) Wilson 指数β_{t}模型：

$$\beta_{\mathrm{t}} = (G + L)/2A$$

式中，S为所研究系统中记录到的总种数；A为群落环境梯度上所发现物种的平均度；G为沿环境梯度增加的物种数；L为沿环境梯度减少的物种数。

动物区系和微生物指数

Yeates G W, Bardgett R D, Cook R et al：在传统的有机的管理下三块威尔士草原土壤中动物区系和微生物的多样性．The Journal of Applied Ecology, 1997, 34

丰富度：$SR = (s-1)/\ln N$

多样性：$H' = -\sum_{i=1}^{s} p_i \ln p_i$

均质性：$J' = H'/H'_{\max}$

优势度：$\lambda = \sum p_i^2$

多样性：$H_2 = -\ln\ \lambda$

成熟指数：$MI = \sum_{i=1}^{n} v_i p_i$

式中，p_i 是第 i 类型中个体的数量；s 是类型的数量；N 是能识别的个体数量；$H'_{max} = \ln s$。

生物多样性和相似指数

Kevan P G, Greco C F, Belaoussoff S：生态系统健康状况诊断和测量中生物多样性和丰富度的对数正规化。The Journal of Applied Ecology, 1997,34

总多样性：

$$H'(GS) = H'(G) + H_G(S)$$

式中，$H'(G)$ 表示群落属的多样性；$H_G(S)$ 是每一个种的平均种多样性，且 $H_G(S) = \sum N_i / NH_i(S)$，$N_i$ 是第 i 物种的个体数量；N 是个体的总数；$H_i(S)$ 表示种 i 中的物种多样性。

为了估计群落物种组成的相似性，可以使用 Jaccard 指数 I_J(Southwood 1971)：

$$I_J = \frac{S_{AB}}{S_A + S_B - S_{AB}}$$

式中，S_{AB} 表示群落 A 和 B 共有的物种；S_A 和 S_B 分别是仅仅在群落 A 和 B 中发现的物种。

香农多样性指数的最小值和最大值

Beisel J N, Moreteau J C1：一个计算香农多样性指数下限的简单公式。Ecological Modelling, 1997, 99

$$H'_{min} = \frac{\ln(Q!) - \ln\{[Q-(S-1)]!\}}{Q}$$

$$H'_{max} = \ln S$$

式中，H'_{min} 和 H'_{max} 是香农多样性指数的最小值和最大值；S 是物种丰富度；Q 是群落的总数。

克隆多样性指数 D

陈小勇，宋永昌：青冈种群克隆多样性及其与环境因子的关系。植物生态学报，1997，21(4)

$$D = 1 - \sum N_i(N_i - 1)/N(N-1)$$
$$N = \sum N_i$$

式中，N_i 为第 i 基株的分株数。

多样性量度公式

廖崇惠，李健雄，黄海涛：南亚热带森林土壤动物群落多样性研究。生态学报，1997，17(5)

(1) 密度-类群指数 DG 模型：

$$DG = \frac{g}{G} \sum_{i=1}^{g} \frac{D_i C_i}{D_{i\max} C}$$

式中，D_i 为第 i 类群生物量(或个体数)；C_i/C 为在 C 个群落中第 i 个类群出现的比率；$D_{i\max}$ 为各群落中第 i 类群的最大生物量；g 为群落中的类群数；G 为各群落所包含的总类群数。

(2) 多群落比较的多样性指数 D_{IC} 模型：

$$D_{IC} = \frac{g}{G} \sum_{i=1}^{n} \left(1 - \frac{|X_{i\max} - X_i|}{X_{i\max} + X_i}\right) \frac{C_i}{C}$$

式中，$X_{i\max}$ 为多个群落中第 i 类群的最大生物量(或个体数)；X_i 为要测量的群落中第 i 类群的最大生物量(或个体数)。

分类学差异指数

Clarke K R, Warwick R M：分类学差异指数及其统计学属性。The Journal of Applied Ecology, 1998, 35

(1) 分类学差异(Warwick 和 Clarke 1995) 被定义为：

$$\Delta \equiv \left(\sum\sum_{i<j} \omega_{ij} x_i x_j \right) \Big/ [n(n-1)/2]$$

式中，$x_i (i = 1, \cdots, s)$ 表示第 i 物种的丰富度；$n (= \sum_i x_i)$ 是样本中个体的总数；ω_{ij} 是在等级分类中连接物种 i 和 j 的路径长度的"差异权重"。两次求和包含了物种 i 和 j 的所有配对。

(2) 当忽略分类学层次时，Δ 简化成 Simpson 多样性的形式：

$$\Delta = (1 - \sum_i p_i^2)/(1 - n^{-1})$$

式中，$p_i = x_i / n$。

(3) 分类学差异的代数定义：

$$\Delta^* = \sum\sum_{i<j} \omega_{ij} x_i x_j \Big/ \sum\sum_{i<j} x_i x_j$$

(4) 一个特例是对每一物种仅使用"存在/缺乏"的信息，因而分类学差异为：

$$\Delta^+ = \sum\sum_{i<j} \omega_{ij} \Big/ [s(s-1)/2]$$

式中，s 是指在 s 个物种中存在 i 和 j 的物种数量。

生态系统中营养结构和过程的多样性模型

Han B：生态系统中营养结构和过程的多样性 Ecological Modelling, 1998, 107

(1) 生态系统的流量多样性：

Ulanowicz (1980)将生态系统的发展能力定义可表达为：

$$H_I = -\sum_{i=1}^{n}(T_i / T_{ST})\lg(T_i / T_{ST})$$

式中，T_{ST} 是总系统流量；T_i 是区室 i 的流量；H_I 通常用于测量流量的综合多样性，它的最大值与区室的数量有关。Ulanowicz 和 Norden (1990)提供了流量多样性的另一个指数：

$$H_H = -\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}(F_{ij} / T_{ST})\lg(F_{ij} / T_{ST})$$

它能被扩展为：

$$H_H = -\sum_{i=1}^{n}(T_i / T_{ST})\lg(T_i / T_{ST}) + \sum_{i=1}^{n}(T_i / T_{ST})H_i$$

$$H_i = -\sum_{j=1}^{n}(F_{ji} / T_{ST})\lg(F_{ji} / T_{ST})$$

(2) 营养结构和过程的综合多样性：

所有区室(C)和所有营养级(L)的全部现存量的综合多样性能通过 Shannon-Weaver 多样性指数获得，即：

$$DX(CL) = -\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{G} w_{ki}\lg w_{ki}$$

$$DX(C) = -\sum_{i=1}^{n} w_{.i}\lg w_{.i}$$

$$DX(L) = -\sum_{k=1}^{G} w_{k.}\lg w_{k.}$$

$$DX_L(C) = -\sum_{k=1}^{G} w_{k.}\sum_{i=1}^{n}(w_{ki}/w_{k.})\lg(w_{ki}/w_{k.})$$

$$DX_C(L) = -\sum_{k=1}^{G} w_{k.}\sum_{i=1}^{n}(w_{ki}/w_{k.})\lg(w_{ki}/w_{k.})$$

式中，$DX(C)$和 $DX(L)$分别是沿着各区室和各营养级的总现存量的分布多样性指数；$DX_C(L)$和 $DX_L(C)$是条件概率的两个多样性，它们能被解释为全部营养级或所有区室的总现存量的平均分布多样性。

山地草甸 β 多样性

高贤明，马克平，黄建辉等：北京东灵山地区植物群落多样性的研究 XI.山地草甸 β 多样性 生态学报，1998，18(1)

1. 二元属性数据测度方法

(1) Whittaker β 多样性指数模型：

$$\beta_W = S/\overline{\alpha}$$

式中，S 为所研究系统记载的所有物种数目；$\overline{\alpha}$ 为各样方或样本的平均物种数。

(2) Cody β 多样性指数模型：

$$\beta_C = [g(H) + l(H)]/2$$

式中，$g(H)$为沿生境梯度 H 增加的物种数目；$l(H)$ 为沿生境梯度 H 失去的物种数目。

(3) Routledge 指数模型：

$$\beta_R = [S^2/(2r + S)] - 1$$

$$\beta_I = \lg T - \left[(1/T)\sum e_i \lg e_i\right] - \left[(1-T)\sum a_j \lg a_j\right]$$

$$\beta = \exp\beta_I - 1$$

式中，r 为分布重叠的物种对数；e_i 为第 i 中出现的样地数；a_j 为样地 j 的物种数目；$T = \sum e_i = \sum a_j$。

(4) Wilson 和 Shmida 指数模型：

$$\beta_T = [g(H) + l(H)]/2\overline{\alpha}$$

(5) 群落相似性系数及其变形——Jaccard 指数和 Sorenson 指数模型：

$$\beta_{CJ} = 1 - C_J$$
$$\beta_{CS} = 1 - C_S$$
$$C_J = j/(a + b - j)$$
$$C_S = 2j/(a + b)$$

式中，j 为两个群落或样地共有种数；a 和 b 分别为样地 A 和样地 B 的物种数。

2. 数量数据测度方法

(1) Bray-Curtis 指数模型：

$$C_N = 2jN/(aN + bN)$$

式中，aN 为样地 A 的物种数目；bN 为样地 B 的物种数目；jN 为样地 $A(jNa)$ 和样地 $B(jNb)$ 共有种中个体数目较小者之和，即：$jN=\sum\min(jNa+jNa)$。

(2) Morisita-Horn 指数模型：

$$C_{MH}=2\sum(an_i\cdot bn_i)/(da+db)aN\cdot bN$$

式中，an_i、bn_i 分别为 A 和 B 样地中第 i 种的个体数目；$da=\sum an_i^2/aN^2$；$db=\sum bn_i^2/bN^2$。

群落模型

从建国：烟台潮间带底栖无脊椎动物群落和多样性研究。生态学报，1998，18(1)

(1) Whittaker 的相似性指数模型：

$$I=1-1/2\left(\sum_i^i|a_i-b_i|\right)$$

式中，S 为 a、b 群落中的相对种数；a_i，b_i 分别为物种 i 的个体数在 a、b 群落中的比例。

(2) Berger-Parker 优势度指数模型：

$$I=N_{\max}/N_{\mathrm{T}}$$

式中，$N_{\max}$ 为优势种群数量；N_{T} 为全部种的种群数量。

(3) 优势集中性指数模型：

$$C=\sum(N_i/N)^2$$

式中，N_i 为每一个种的个体数；N 为总个体数。

(4) Shannon-Wiener 多样性指数模型：

$$H'=3.3219\left(\lg N-\frac{1}{N}\lg n_i\right)$$

式中，N 为所有种的个体总数；n_i 为第 i 种的个体数。

(5) 均匀度模型：

$$E=H/H'_{\max}=H'/\ln s$$

群落多样性测度指标计算

闫传海：淮河下游地区针叶林多样性研究。生态学杂志，1998，17(2)

(1) 多样性指数 I_{sd} 模型：

$$I_{\mathrm{sd}}=-\sum P_i\ln P_i$$

(2) 均匀度指数 I_{ce} 模型：

$$I_{\mathrm{ce}}=\frac{-\sum P_i\ln P_i}{\ln S}$$

(3) 生态优势度指数 I_{ed} 模型：

$$I_{\mathrm{ed}}=-\sum P_i^2$$

式中，P_i 为种 i 的相对重要值；S 为种 i 所在样地的物种总数。

(4) 相对重要值 V_n 模型：

$$V_{\mathrm{n}}=\frac{\text{相对密度}+\text{相对频度}+\text{相对优势度}}{300}$$

植物群落物种数目的估计模型

刘灿然，马克平，于顺利等：北京东灵山地区植物群落多样性研究 VI. 几种类型植物群落物种数目的估计。生态学报，1998，18(2)

1.经验贝叶斯估计方法

(1) 总种数估计量 S_e 模型：

$$S_{\mathrm{e}}=c(\alpha,\beta)n_1+\sum_{x=2}^{n}n_x$$

(2) S_e 的方差模型：

$$V(S_{\mathrm{e}})=S_{\mathrm{e}}\left[c^2\gamma_1(1-\gamma_1)-\sum_{x=2}^{n}\gamma_x(1-\gamma_x)\right]$$

$$\gamma_1=\begin{cases}[c-(n-3)\cdot(n-1)]/\{2[c+1/(n-1)]\} & \text{当}c>(n-3)/(n-1)\\ 0 & \text{当}c<(n-3)/(n-1)\end{cases}$$

$$\gamma_x=(1-\gamma_1)/(x-1)\quad(x=2,3,\cdots,n)$$

2. 非参数估计方法

(1) 刀切法：

(a)一阶刀切估计量模型：

$$J_n^1(S)=s'+[r_{1(1)}(n-1)]/n$$

(b) 一阶刀切估计的方差模型：

$$Var\{J_n^1(S)\}=[(n-1)/n]\sum_{j=1}^{s'}\left[j^2f_j-r_{1(1)}{}^2/n\right]$$

(c)二阶刀切估计量模型：

$$J_n^2(S)=s'+[r_{1(1)}(2n-3)]/n-[r_{1(2)}(n-2)^2]/n(n-1)$$

式中，n 为样本种包含的样方数；s' 为观察到的物种数目；$r_{1(1)}$ 为恰在一个样方中出现的种数；f_j 为包含

i [illegible] 种的样方数；$r_{(i2)}$ 为恰在两个样方中出现的[illegible]

(2) [illegible]助法：

(a)自助[illegible]计量 $S_{b(n)}$ 模型：

$$S_{b(n)} = s' + \sum_{j=1}^{s'} \left(1 - Y_j/n\right)^n$$

(b)自助估计的方差 $Var\{S_{b(n)}\}$ 模型：

$$Var\{S_{b(n)}\} = \sum_{j=1}^{s'} \left(1 - Y_j/n\right)^n \left[1 - \left(1 - Y_j/n\right)^n\right] + \sum_{j \neq k}\sum \left[\left(Z_{jk}/n\right)^n - \left(1 - Y_j/n\right)^n \left(1 - Y_k/n\right)^n\right]$$

式中，Y_j 为种 j 出现的样方数；Z_{jk} 为种 j 和种 k 都不存在的样方数。

物种多样性测度方法

贺金生，陈伟烈，江明喜等：长江三峡地区退化生态系统植物群落物种多样性特征．生态学报，1998，18(4)

(1) Simpson 指数 D 模型：

$$D = N(N-1) \Big/ \sum_{i=1}^{n} n_i(n_i - 1)$$

(2) Shannon-Wiener 指数 H' 模型：

$$H' = -\sum_{i=1}^{n} P_i \ln P_i$$

(3) 种间相遇几率 E_{pi} 模型：

$$E_{pi} = \sum_{i=1}^{n} n_i(N - n_i) / N(N - n_i)$$

(4) McIntosh 指数 d 模型：

$$d = 1 - \left(\sum p_i^2\right)^{1/2}$$

(5) Pielou 的均匀度指数 J 模型：

$$J = \left(-\sum_{i=1}^{n} P_i \ln P_i\right) \Big/ \ln S$$

式中，P_i 为种 i 的相对重要值；n_i 为种 i 的重要值；N 为种 i 所在样方的各个种的重要值之和

趋势面分析模型

李凌浩，刘先华，陈佐忠：内蒙古锡林河流域植被多样性特点及其与气候因子的关系．植物生态学报，1998，22(5)

$$\tau(x, y) = \sum_{p}^{n-q} \sum_{q}^{n} \beta_{pq} x^p y^q$$

式中，x,y 为坐标值；τ 为 x,y 的函数；β_{pq} 为多项式系数。

多样性指数和平坦指数

Stohlgren TJ, Schell L D, Heuvel B V：在岩石山地草原上，放牧和土壤质量对本地种以及外来植物多样性的影响．Ecological Applications, 1999, 9(1)

(1) 使用两个多样性指数和一个平坦指数。N_1 是一个丰富的物种的数量的指数，N_2 衡量非常丰富的物种的数量，较高的 N_1 或 N_2 值表明占统治地位的物种的多样性更高。

N_1 的计算可表达为：

$$N_1 = e^{H'}$$

式中，H' 是 Shanon 的指数，对于一个样本可定义为：$\hat{H}' = -\sum_{i=1}^{S}\left[\frac{n_i}{n}\ln\frac{n_i}{n}\right]$，$n_i$ 是样本中 S 个物种里面的第 i 物种的覆盖度，n 是样本中所有物种的总的覆盖度。

N_2 可被定义为：

$$N_2 = 1/\lambda$$

式中，λ 是 Simpson 的指数，对于一个样本可被定义为 $\hat{\lambda} = \sum_{i=1}^{S}\frac{n_i(n_i-1)}{n(n-1)}$。

(2) 使用被修正了的山地比率 (E_5) 作为平坦指数：

$$E_5 = \frac{1/\lambda - 1}{e^{H'} - 1} = \frac{N_2 - 1}{N_1 - 1}$$

当一个物种逐渐增加，在叶片覆盖度占据统治地位时，E_5 趋近于 0。

群落的多样性模型

张峰，上官铁梁：山西翅果树群落的多样性研究．植物生态学报，1999，23(5)

(1) 丰富度指数 N_0 模型：

$$N_0 = S$$

(2) 多样性指数 N 模型：

$$N_1 = e^{H'}$$

$$N_2 = \frac{1}{\lambda}$$

(3) 均匀度指数 E 模型：

$$E = \frac{\frac{1}{\lambda} - 1}{e^{H'} - 1}$$

式中，S 为每个样方内出现的种数；H' 为 Shannon- Weiner 指数；λ 为 Simpson 指数。

种-面积曲线的拟合与评价模型

刘灿然，马克平，于顺利等：北京东灵山地区植物群落多样性研究——种-面积曲线的拟合与评价．植物生态学报，1999，23(6)

1. 模型的选择

(1) 非饱和曲线模型：

$$S = b + aA$$

$$S = b + a\ln A$$

$$S = (a + a\ln A)^c$$

$$S = a\ln(A+1)$$

$$S = a\ln(bA+1)$$

$$S = aA^b$$

(2) 饱和曲线模型：

$$S = \frac{aA}{1+bA}$$

$$S = \frac{c}{1+ae^{-bA}}$$

$$S = c - ae^{-bA}$$

$$S = a(1-e^{-bA})$$

式中，A 为面积；S 为 A 中出现的物种数目；a，b，c 均为模型中的参数。

2. 模型的评价

(1) 剩余标准差 E_{rs} 模型：

$$E_{rs} = \sqrt{\frac{Q}{n-k-1}}$$

(2) 相关指数 I_{cr} 模型：

$$I_{cr} = 1 - \frac{(n-1)Q}{(n-k)S_{ts}}$$

(3) 绝对偏差的平均值 D_{aa} 模型：

$$D_{aa} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|S_i - S_{ti}\right|$$

(4) 相对偏差绝对值的平均值 D_{aar} 模型：

$$D_{aar} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{S_i - S_{ti}}{S_i}\right|$$

式中，$Q = \sum_{i=1}^{n}(S_i - S_{ti})^2$；$S_{ts} = \sum_{i=1}^{n}(S_i - S_a)^2$；$S_a = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}S_i$；$S_i$ 和 S_{ti} 分别为观察的和通过计算的物种数目；S_a 为 S_i 的平均值；n 为样本含量；k 为模型中参数的个数。

栖息地多样性

Fox B J, Fox M D：在岛状栖息地和隔离种群中决定哺乳动物物种丰富度的因素——栖息地多样性、干扰、敌种相互作用和种群集中规则。Global Ecology and Biogeography, 2000, 9

$$\text{Diversity} = 1/\sum_i p_i^2$$

式中，$p_i = n_i / N$，$N = \sum_i n_i$，n_i 是第 i 物种中个体的数量或者是第 i 栖息地中陷井地点的数量。

辛普森植物多样性指数

Howe H F, Brown J S：啮齿类食谷动物对实验用的非禾本草本植物群落的早期影响．Ecological Applications, 2000, 10(3)

$$D = 1/\sum p_i^2$$

式中，p_i 是指在一个特定样本的所有个体中，种 i 的个体频率。

生境多样性(D_h)

Miller J R, Cale P：在破碎的农业景观中鸟类的行为机制与生境利用．Ecological Applications, 2000, 10(6)

香农-威廉指数可用来描述每个迹地的生境多样性：

$$D_h = \sum_{i=1}^{k} f_i \lg f_i$$

式中，f_i 是指生境占迹地总面积的比例；k 是迹地内生境类型的数量。

二次熵多样性指数 Q

Izsák J, Papp L：生态多样性与生物多样性的联系 Ecological Modelling, 2000, 130

$$Q=\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{s}d_{ij}p_i p_j$$

式中，d_{ij} (i, j=1,…,s) 是物种之间的差异的度量，$d_{ij}=d_{ji}$，d_{ii}=0；s 表示物种数量；p_i(i=1,…, s) 定义了某个个体属于物种 i 的概率；Q 表示了物种间的差异的期望值。

当每个物种的丰度完全一样时，Q 可以表示为：

$$J=\frac{1}{s^2}\sum_{i,j}d_{ij}$$

式中，J 表示物种间的平均分类学意义上的距离，J 把生态多样性与生物多样性两者联系起来，但它不满足单调性要求；引入另一个测度 F 其计算公式可表达为 $F=s^2\cdot J=\sum_{i,j}d_{ij}$，它表示了物种差异的和，而且满足单调性要求，比平均差异更适合作生物多样性的测度指数。

基于过程的种属植物模型

Kleidon A, Mooney H A：从气候约束推断的全球生物多样性分布一个基于过程的模型研究结果 Global Change Bioligy, 2000, 6

（1）生长条件：

$$f_{\text{grow,W}}(t)=\frac{f_{\text{W}}+\tau_{\text{W}}f_{\text{grow,W}}(t-\Delta t)}{1+\tau_{\text{W}}}$$

$$f_{\text{W}}=\frac{W}{W_{\max}}$$

$$\tau_{\text{W}}=10^{4p_1-2}$$

$$f_{\text{grow,T}}(t)=\frac{f_{\text{T}}+\tau_{\text{T}}f_{\text{grow,T}}(t-\Delta t)}{1+\tau_{\text{T}}}$$

$$f_T=\frac{T}{T+T_{\text{Crit}}}$$

$$\tau_T=10^{4p_2-2}$$

$$f_{\text{grow}}=\begin{cases}0 & (f_{\text{grow,W}}<0.05 \quad \text{或} \quad f_{\text{grow,T}}<0.05)\\ 1 & (f_{\text{grow,W}}\geq 0.05 \quad \text{且} \quad f_{\text{grow,T}}\geq 0.05)\end{cases}$$

（2）萌芽条件：

$$A_0=10^{8p_3-7}A_{00}$$

（3）分配及衰老条件：

$$f_{\text{NPP}}(t)=\frac{\text{NPP}+\tau_{\text{NPP}}f_{\text{NPP}}(t-\Delta t)}{1+\tau_{\text{NPP}}}$$

式中，$\tau_{\text{NPP}}=10^{4p_4-2}$；$f_{\text{SEN}}=\begin{cases}0 & (f_{\text{NPP}}<0)\\ 1 & (f_{\text{NPP}}\geq 0)\end{cases}$

（4）存量的变化模型：

碳存量的动力学可用下列方程表示：

$$\frac{dA}{dt}=\text{NPP}-(f_{\text{AS}}+f_{\text{AL}}+f_{\text{AR}})A$$

$$\frac{dL}{dt}=f_{\text{AL}}(1-f_{\text{LW}})A-f_{\text{LD}}c_{N_{se}}$$

$$\frac{dR}{dt}=f_{\text{AR}}(1-f_{\text{RW}})A-f_{\text{RD}}c_{N_{se}}$$

$$\frac{dS}{dt}=f_{\text{AS}}A$$

$$\frac{dW_L}{dt}=f_{\text{AL}}f_{\text{LW}}A$$

$$\frac{dW_R}{dt}=f_{\text{AR}}f_{\text{RW}}A$$

参数 f_{XY} 由下列式子给出：

$$f_{\text{AS}}=\frac{p_5}{p_5+p_6+p_7+p_8}f_{D_{sec}}$$

$$f_{\text{AL}}=\frac{p_6}{p_5+p_6+p_7+p_8}f_{W_{gro}}$$

$$f_{\text{AR}}=\frac{p_7}{p_5+p_6+p_7+p_8}f_{W_{gro}}$$

$$f_{\text{LW}}=p_9$$

$$f_{\text{RW}}=p_{10}$$

$$f_{\text{LD}}=\begin{cases}0 & (f_{N_{se}}\geq 0)\\ 1 & (f_{N_{se}}<0)\end{cases}$$

$$f_{\text{RD}}=\begin{cases}0 & (f_{N_{se}}\geq 0)\\ 1-p_{11} & (f_{N_{se}}<0)\end{cases}$$

（5）土地表面参数：

$$W_{\max}=\max[W_{\max,0},c_{\max}\sqrt{W_{\text{R}}}]$$

$$l_{\text{la}}=C_{l_{\text{la}}}L$$

$$Tr_{\text{Supply}}=c_{\text{TRS}}Rf_{\text{W}}$$

$$f_{\text{VEG}}=1-e^{-kl_{\text{la}}}$$

$$f_{\text{FOR}}=1-e^{-c_{\text{FOR}}W_{\text{L}}}$$

$$a=f_{\text{VEG}}a_{\text{VEG}}+(1-f_{\text{VEG}})a_{\text{SOIL}}\ ℃$$

$$W_{L_{\text{MAX}}}=c_{\text{WLMAX}}l_{\text{la}}$$

(6) 初级净生产力(NPP):

$$GPP = c_{GPP}\alpha_{LUE}\alpha_{H_2O}\alpha_T f_{VEG}PAR$$

$$S_{re} = \alpha_{LUE}Q_{10}^{(T-10^\circ C)/10^\circ C} \times [c_{RES,1}(L+R) + c_{RES,2}(W_L + W_R)]$$

$$NPP = GPP - S_{re}$$

式中，α_i 为限制性因素。

(7) 土地表面成分:

$$\Delta W = \Delta W_{max} \frac{W_{SUB}}{W_{SUB,max}}$$

(8) 模型用到的状态变量和参数的注释:

状态变量:

以上方程式中：A 为吸收/储存的碳存量；S 为繁殖部分的碳存量；L 为叶碳存量；W_L 为地面上组织结构的碳存量；W_R 为地面下组织结构的碳存量；f_{AL} 为吸收营养分配到地面上组织生长的比例；f_{AS} 为吸收营养分配到繁殖部分的比例；f_{AR} 为吸收营养分配到地下组织生长的比例；f_{LW} 为分配到地面组织叶之外其他部分的比例；f_{RW} 为分配到地下组织除根之外其他部分的比例；f_{LD} 为叶的衰老死亡率；f_{FR} 为根的衰老死亡率；$f_{grow,T}$ 为依赖于时间的生长温度条件；$f_{grow,W}$ 为依赖于时间的土壤湿度条件；f_{Pnp} 为有利于时间的生产力条件；f_{grow} 的值为 0 时为不生长，值为 1 时为生长情况；f_{SEN} 的值为 0 时为不衰退，值为 1 时为衰退情况；f_{SEED} 的值为 0 时为不繁殖，值为 1 时为繁殖情况；τ_T 为温度条件的时间响应；τ_W 为土壤湿度的时间响应；τ_{SEN} 为生产力条件的时间响应；GPP 总初级生产力；S_{re} 为自给营养的呼吸作用；NPP 为净初级生产力；α_{LUE} 为植物光的使用效率(也称影响呼吸作用)；α_{H_2O} 为水的限制；α_T 为温度的限制。

模型中使用参数:

以上式中：A_0 为种子种类大小（等于碳的初始数量）；A_{00} 为种子大小参数；c_{GPP} 为光的最大利用效率；$c_{RES,1}$ 为叶和根的生物数量呼吸比率；$c_{RES,2}$ 为生物数量结构的呼吸比率；c_{SEN} 为衰退期碳还原数量；Q_{10} 为呼吸系数；T_{crit} 为生长条件的临界温度；p_1 为对湿度条件的生长时间响应；p_2 为对温度条件的生长时间响应；p_3 为吸收的初始数量；p_4 为对净生产力条件的衰老时间响应；p_5 为繁殖的分配；p_6 为地面上生长的分配；p_7 为地下生长的分配；p_8 为储存量的分配；p_9 为地面上结构的相关分配；p_{10} 为地下结构的相关分配；p_{11} 为地面上的相关衰退；p_{12} 为光使用效率的标准；W_{MAX} 为植物可利用的土壤湿度储存能力；l_{la} 为叶面积指数；f_{VEG} 为植被覆盖度；f_{FOR} 为森林覆盖度；a 为地表反射率；a_{SOIL} 为裸土反射率；a_{VEG} 为植被反射率；c_{FOR} 为从 W_L 到 f_{FOR} 的转换因子；$c_{l_{la}}$ 为从 L 到 l_{la} 的特殊的叶面积转换因子；c_{mlmax} 为从 L 到 $W_{l,max}$ 的转换因子；c_{wmax} 为从 W_R 到 W_{max} 的转换因子；k 为消光系数；$W_{l,max}$ 为叶冠拦截储量；$W_{max,0}$ 为 W_{max} 的最小价值；W_{SNOW} 为积雪中的水存储数量；W_L 为叶冠拦截水的数量；W_S 为根部水的储存量；W_{SUB} 为根部土壤地下水的存储量。

多样性指数的选择与测定

王淼，李秋荣，姬兰柱等：杉木天然次生林全龟子多样性及季节动态变化. 生态学杂志, 2000, 19(6)

(1) 物种丰富度 d_{MA} 模型:

$$d_{MA} = \frac{S-1}{\ln N}$$

式中，S 为物种数；N 为所有物种的个体数。

(2) 生态优势度 C 模型:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{S} n_i(n_i - 1)}{N(N-1)}$$

式中，n_i 为第 i 物种的个体数；N 为所有物种的个体数。

物种-面积的相关模型

Lomolino M V, Weiser M D: 一个更通用的物种-面积关系式-所有大小岛屿上的多样性. Journal of Biogeography, 2001, 28

(1) 半-对数模型:

$$S = b_0 + b_1 \lg A$$

(2) 对数-对数模型:

$$\lg S = b_0 + b_1 \lg A$$

式中，S 是物种丰富度或者是已知样本的物种数量；A 是样本的面积；b 是回归系数。

(3) 用带有断点转换的线性回归来估算小岛影响的上限(SIE_s):

$$Y = b_0 + b_1[(\lg A - T_1) \times (\lg A > T_1)]$$

式中，Y 是物种丰富度(S)或者 $\lg S$；A 是岛屿的面积；T_1 是 SIE_s 的上限；$(\lg A > T_1)$ 是一个返回逻辑值 0 或 1 的变量。

杉木林群落多样性模型

肖文发，程瑞梅，李建文等：三峡库区杉木林群落多样性研究. 生态学杂志, 2001, 20(1)

(1) 重要值模型：

$$重要值_{乔}=\frac{相对密度+相对频度+相对显著度}{3}$$

$$重要值_{灌}=\frac{相对盖度+相对频度}{2}$$

$$重要值_{草}=\frac{相对盖度+相对频度}{2}$$

(2) 多样性测度方法：

1) 丰富度指数模型：

物种丰富度指数 S = 出现在样方的物种数

2) 多样性指数模型：

$$D=1-\sum_{i=1}^{S}\frac{n_i(n_i-1)}{n(n-1)}$$

$$H'=-\sum_{i=1}^{S}P_i\ln P_i$$

3) 均匀度指数模型：

$$J=\frac{H'}{\ln S}$$

$$E=\frac{\left(\sum_{i=1}^{S}P_i^2\right)^{-1}-1}{\exp\left(-\sum_{i=1}^{S}P_i\ln P_i\right)-1}$$

式中，D 为 Simpson 多样性指数；H' 为 Shannon-Wiener 多样性指数；J 为 Pielou 均匀度指数；E 为 Alatalo 均匀度指数；p_i 为种 i 的相对重要值；n_i 为种 i 的重要值；n 为所有种的重要值总和；S 为物种数。

遗传相似度模型

胡宝忠，刘娣，胡国富等：羊草遗传多样性的研究．植物生态学报，2001，25(1)

$$F=\frac{2N_{xy}}{N_x+N_y}$$

式中，F 为 RAPD 片断的平均遗传相似度；N_{xy} 为 x、y 两个品种共有的扩增带；N_x、N_y 为 x、y 两个品种分别拥有的扩增带。

多样性分析指数

杨利民，韩梅，李建东：中国东北样带草群落放牧干扰植物多样性的变化．植物生态学报，2001，25(1)

(1) 丰富度指数模型：

$$Q=\frac{0.5n_{R_1}+\sum n_r+0.5n_{R_2}}{\ln\frac{R_2}{R_1}}$$

(2) 均匀度指数模型：

$$E=\frac{D-1}{e^{H'}-1}$$

(3) 多样性指数模型：

$$H'=-\sum\frac{n_i}{N}\ln\frac{n_i}{N}$$

$$D=\frac{1}{\sum\frac{n_i(n_i-1)}{N(N-1)}}$$

式中，N 为物种总密度；n_i 为第 i 种密度；R_1，R_2 分别为四分位低点和高点时个体数；n_{R_1}、n_{R_2} 分别为四分位低点和高点时种数；n_r 为四分位点间总种数。

森林物种多样性指数

杨万勤，钟章成，陶建平：缙云山森林土壤速效P的分布特征及其与物种多样性的关系研究．生态学杂志，2001，20(4)

(1) Hill 的多样性指数族 N_A 模型：

$$N_A=\sum_{i=1}^{S}P_i^{\frac{1}{1-A}}$$

式中，P_i 为第 i 种个体(或胸面积盖度)所占比值；N_0 为物种数；N_1 为测定样本中丰富的物种数；N_2 为测定样本中非常丰富的物种数。

(2) Shannon-Wiener 指数 H' 模型：

$$H'=-\sum_{i=1}^{S}P_i\ln P_i$$

景观多样性分析模型

管东生，钟晓燕，郑淑颖：广州地区森林景观多样性分析．生态学杂志，2001，20(4)

(1) 景观类型多样性的测定：

1) 多样性指数 H 模型：

$$H=-\sum_{i=1}^{m}P_i\lg P_i$$

式中，P_i 为景观类型 i 所占面积的比例；m 为景观类型的数目。

2) 优势度 Do 模型：

$$Do = H_{max} - H$$

式中，H_{max} 为最大多样性指数。

3) 均匀度 E 模型：

$$E = \frac{H}{H_{max}} \times 100\%$$

(2) 景观格局多样性测定：

1) 聚集度 RC 模型：

$$RC = 1 - \frac{C}{C_{max}}$$

式中，C 为复杂性指数；C_{max} 为 C 的最大可能取值。

2) 分离度模型：

$$F_i = \frac{D_i}{S_i}$$

$$D_i = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{n}{A}}$$

$$S_i = \frac{A_i}{A}$$

式中，F_i 为景观类型 i 的分离度；D_i 为景观类型 i 的距离指数；A 为景观总面积；A_i 为景观类型 i 的总面积；n 为景观类型 i 的斑块总数。

3) 分维数 D 模型：

$$P = kA^{D/2}$$

式中，P 为斑块周长；A 为斑块面积。

(3) 斑块多样性的测定：

景观内部生境面积破碎化指数模型：

$$FI_1 = 1 - \frac{A_i}{A}$$

$$FI_2 = 1 - \frac{A_1}{A}$$

式中，FI_1 和 FI_2 为两个景观类型内部生境面积破碎化指数；A_i 为某一景观类型内部总面积；A_1 为该景观类型最大斑块面积；A 为景观的总面积。

生物多样性评价模型

杨学军，姜志林：溧阳地区森林景观的生物多样性评价．生态学报，2001，21(4)

(1) 溧阳地区主要森林类型的生物多样性特点——时间-稳定性权系数 C 模型：

$$C = \ln(a + 1)$$

式中，a 为系统中某一层次外貌发育趋于稳定的时间

(2) 区域森林景观的物种多样性特征及其变化——物种多样性指标模型：

$$W = \sum_{i=1}^{8} A_i (I'_{sh})_i$$

式中，I'_{sh} 为时间-稳定性权系数和；A_i 为第 i 种森林类型所占的面积比例。

群落多样性变化分析模型

许木启，朱江，曹宏：白洋淀原生动物群落多样性变化与水质关系研究．生态学报，2001，21(7)

(1) 单位体积中的个体数量模型：

$$N = \frac{V_s n}{V V_a}$$

式中，N 为 1L 水中原生动物的个体数；V 为采样体积；V_s 为沉淀体积；V_a 为计算体积；n 为计数所得的个体数。

(2) 多样性指数 D 模型：

$$D = \frac{S - 1}{\ln N}$$

式中，S 为种类数；N 为个体数。

基于多维分数维的生态多样性模型

Yue T X, Liu J Y, Jørgensen S E et al：半个世纪以来中国生态多样性的变化．Ecological Modelling, 2001, 144

作者在分析了已有模型的缺陷后，提出了基于多维分数维的生态多样性模型：

$$d(t) = -\frac{\ln\left\{\sum_{i=1}^{m[\varepsilon(t)]} [p_i(t)]^{\frac{1}{2}}\right\}^2}{\ln[\varepsilon(t)]}$$

式中，$p_i(t)$ 为第 i 种诸如物种、景观元或 Holdridge 生命区等研究对向的概率；$m[\varepsilon(t)]$ 为研究对象的总数；$\varepsilon(t)$ 为观测尺度；t 为时间变量。

第二十六章　毒理生态学

害虫物种数量的回归方程

Banerjee B：纬度、年龄和面积对茶树的节肢动物害虫物种数量的影响分析　Journal of Applied Ecology, 1981, 18

$$\lg S_{\text{pecies}} = -5.36 + 1.26\lg A_{\text{ge}} + 0.34\lg A_{\text{rea}}$$

不饱和多孔渗水介质中化学物质转移的数学模型

Kalmaz E V, Barbieri J L：轴防护作业附近多孔渗水介质中放射性有毒化学物质扩散的数学建模和计算机模拟. Ecological Modelling, 1981,13

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D\frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - V\frac{\partial c}{\partial z} - \frac{1}{n_e}\frac{\partial s}{\partial t} - Kc$$

式中，c 是土壤溶液中化学物质的浓度；s 是被吸附了的化学物质；t 是吸附的时间；D 是水动力学扩散系数；z 是距离；V 是空隙水速度的大小；介质的体积密度是 l；有效的空隙渗水(土壤水容量部分)为 n_e；K 是转化率常数.

(1) 初始条件和边界条件：

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2}\left\{\exp\left[\frac{z}{2D}\left(V - \sqrt{V^2 + 4DK}\right)\right]\times \operatorname{erfc}\left(\frac{z - t\sqrt{V^2 + 4DK}}{2\sqrt{Dt}}\right) + \exp\left[\frac{z}{2D}\left(V + \sqrt{V^2 + 4DK}\right)\right]\times \operatorname{erfc}\left(\frac{z + t\sqrt{V^2 + 4DK}}{2\sqrt{Dt}}\right)\right\}$$

$$V = V^* / R_d$$

$$D = D^* / R_d$$

$$K = K^* / R_d$$

式中，$\operatorname{erfc}(z)$ 是误差函数；$R_d = 1 + K_d(l / n_e)$，K_d 是分布系数。

(2)　二维平面上的流体运动和连续性的组合方程为：

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_x\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_z\frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - u\frac{\partial c}{\partial x} - V\frac{\partial c}{\partial z} - Kc$$

土壤中杀虫剂动态仿真模型

Rao P S C, Jessup R E：描述土壤中杀虫剂动力学的仿真模型的发展和验证. Ecological Modelling, 1982, 16

1. 描述对流-扩散的杀虫剂的迁移模型为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\Theta C + \rho S) = -\left[\frac{\partial}{\partial z}\left(-\Theta D\frac{\partial C}{\partial z} + qC\right)\right] - \sum_{i=1}^{n} Q_i$$

在稳定水流的条件下（也就是 $\partial\Theta / \partial t = 0$）：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\rho}{\Theta}\frac{\partial S}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v\frac{\partial C}{\partial z} - \frac{1}{\Theta}\sum_{i=1}^{n} Q_i$$

2. 保持力和转化力模型

(1) 平衡模型：

①线性方程：

$$S = k_1C + k_2 \quad (k_2 > 0)$$

②Langmuir 方程：

$$S = k_1C / (1 + k_2C)$$

③ Freundlich 方程：

$$S = k_1C^{k_2}$$

$$S = k_1Ce^{-2k_2S}$$

④修正了的 Kjelland 方程：

$$S = CS_m / \{C + k_1(C_m - C)\exp[k_2(C_m - 2C)]\}$$

⑤接近平衡的部分：

$$S = Q_{\text{FRE}}k_1C^{k_2}$$

(2) Kinetic 模型：

①线性方程：

$$\frac{\partial S}{\partial t} = k_r(k_1C + k_2 - S)$$

②Langmuir 方程：

$$\frac{\partial S}{\partial t}=k_r[(k_1C)/(1+k_2C)-S]$$

③Freundlich 方程：

$$\frac{\partial S}{\partial t}=k_r(k_1C^{k_2}-S)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t}=k_re^{k_2S}(k_1Ce^{-2k_2S}-S)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t}=k_r(S_m-S)\sinh[k_2(S_m-S)/(S_m-S_i)]$$

④两个地点：

$$\frac{\partial S}{\partial t}=\frac{\partial S_1}{\partial t}+\frac{\partial S_2}{\partial t}$$

$$\frac{\partial S_1}{\partial t}=k_rC^{k_2}\frac{\partial C}{\partial t}$$

$$\frac{\partial S_2}{\partial t}=k_r(k_1C^{k_2}-S_2)$$

(3) 降解模型：

①一阶方程：

$$Q=k_d(\Theta C+\rho S)$$

②幂速率：

$$Q=k_{d1}C^{k_{d2}}$$

③双曲线：

$$Q=k_{d1}/(k_{d2}+C)$$

式中，C 是溶解阶段的浓度；C_m 是最大溶解浓度；D 是杀虫剂扩散系数；Q_{FRE} 是平衡时的吸附部分；h 是土壤水势；$K(\Theta)$ 是土壤水压传导性；k_1，k_2 和 k_3 是经验吸附等温常数；k_{d1} 是降解率常数；k_{d2} 是经验降解常数；k_r 是吸附-解吸附率常数；q 是达西土壤水流量；Q 是杀虫剂降解的下沉时间；S 是吸附阶段浓度；S_1 是在“快速”地点中吸附阶段浓度；S_2 是在“慢速”地点中吸附阶段浓度；S_i 是初始的吸附浓度；S_m 是最大吸附浓度；t 是时间，$t_1/2$ 是土壤中杀虫剂生存期的一半；U 是被根吸收的土壤水的下沉时间；v 是平均的空隙水速度；z 是距离；Θ 是土壤水的体积容量；ρ 是土壤的体积密度。

种群中有毒物质总量动态模型

Hallam T G, Clark C E, Lassiter R R：有毒物对种群的影响：一个定性方法 I—均衡环境显示．Ecological Modelling, 1983, 18

$$dy(t)/dt=R_E+R_B-R_L$$

$$y(t)=mc_0(t)x(t)$$

式中，$x(t)$ 是指种群密度；$c_0(t)$ 指体重；种群中有毒物质的总量 $y(t)=mc_0(t)x(t)$ 是一个很有用的辅助变量，m 代表单个有机体中的毒物量，R_E 是环境摄入毒物的速率；R_B 是指新生体中毒物总量的变化速率，R_L 指毒物从种群中失去的速率。

不依赖于年龄的害虫模型

Mangel M, Plant R E：农业害虫的多季节管理：I：理论的发展 Ecological Modelling, 1983, 20

(1) 设 $X(t)$ 为在时间 t 时田间害虫的总数，$C(t)$ 是作物的测度值。假定作物在对密度的依赖变得重要之前收获，则作物的动态方程为：

$$\frac{dC}{dt}=\begin{cases}r_0C-vX & (C(t)>0)\\ 0 & (C(t)=0)\end{cases}$$

$$C(0)=C_0 \qquad (0\leqslant t\leqslant T)$$

式中，C_0 是一个正常数；参数 r_0 是作物固有的生长速度；v 是害虫对作物消费的单位速度；T 是季节的长度。

(2) 在第 n 年的一个季节内的喷雾强度用 $s(t;n)$ 表示。在大多数情况下，假定杀虫剂只使用一次，则 $s(t;n)$ 可用下式表示：

$$s(t,n)=\begin{cases}0 & (0\leqslant t<t_s(n))\\ \eta(n) & (t_s(n)\leqslant t<t_s(n)+\delta(n))\\ 0 & (t_s(n)-\delta(n)\leqslant t\leqslant T)\end{cases}$$

式中，$\eta(n)$ 是在第 n 年的喷雾强度；$\delta(n)$ 是杀虫剂在第 n 年内的活性时间长度。

(3) 假设害虫种群数量的增长速度不依赖于 C 的值，则害虫组成的微分方程为：

$$\frac{dX}{dt}=r(t;n)X+I(t;n)$$

$$X(0;n)=0 \qquad (0\leqslant t\leqslant T)$$

式中，$I(t;n)$ 是在第 n 年的时间 t 时的迁入速度；$r(t;n)$ 是在第 n 年的时间 t 时的种群固有的增长速度，它通过喷雾作用依赖于 n 和 t，也就是说，当使做了

杀虫剂后，$X(t)$ 的减少可通过对 $r(t,n)$ 取反来进行模拟，可以选用下式：

$$r(t,n)=r_0\left[1-\frac{\omega s(t,n)}{e+s(t,n)}\right]$$

式中，r_0 是未喷杀虫剂的固有增长速度；ω 是指接近无穷大时最大杀虫效果值；e 与 LD_{50}（杀掉 50%害虫所需的喷雾强度)相关。

临界效果模型

Hahn B D, Furniss P R：家畜炭疽热的一个确定性模型：临界效果 Ecological Modelling，1983，20

$$dv/dt=-av$$

$$da/dt=\alpha a+\beta c$$

$$dc/dt=av\quad \delta c$$

式中，a 为环境污染值，它是指一个动物在一天之中有效摄入的炭疽孢子的数量；$v(t)$是指在时间 t 时易受侵害的动物的数量；$c(t)$指死于炭疽热的动物尸体数量；α 是指代表孢子死亡或从环境中移出的污染物腐烂速率；β 是指污染物从动物尸体是散发出来的速率；δ 是指动物尸体的腐烂速率。在初始条件下，$v(0)=v_0$，$a(0)=0$，$c(0)=c_0=1$。

一代的繁殖率是指来自一个动物尸体的 v_0 个易受侵害的个体中的新案例期望值，等于 $v_0\beta/(\alpha\delta)$。如果这个值超过总数，就会有附生生物，也就是说，如果 $v_0>\theta$，则它可被认为是疾病的阈值。在这里，$\theta=\alpha\delta/\beta$。

附生生物的相对量 σ 可表达为：

$$\sigma\equiv(v_0-v_\infty)/v_0$$

根据它可以给出下式：

$$(\sigma+c_0/v_0)/\lg(1-\sigma)=-\theta/v_0$$

一个动物尸体上污染物达到最大值所需的时间 T 可表达为：$T=\lg(\alpha/\delta)/(\alpha-\delta)$。

序贯抽样模型

向春光，顾秀慧，贝亚维等：序贯抽样技术——用于褐稻虱的防治和研究．生态学报，1983，3(1)

(1) Iwao 的序贯抽样模型：

$$T_0'(n)=nx_c+t\sqrt{n[(\alpha+1)x_c+(\beta-1)x_c^2]}$$

$$T_0''(n)=nx_c-t\sqrt{n[(\alpha+1)x_c+(\beta-1)x_c^2]}$$

式中，$T_0(n)$ 为累计虫数；n 为已抽取子样数量；x_c 为判别密度(防治指标)；α,β 分别为回归式的截距和斜率。

(2) Kuno 的序贯抽样的预定截止线模型：

$$T_n=\frac{\alpha+1}{D_0^2-\frac{\beta-1}{n}}$$

式中，各项同上。

二代残虫造成的皮棉经济损失 L_2 模型

盛承发，丁岩钦，冯世族：华北棉区药剂防治二代棉铃虫经济生态学效益分析．生态学报，1983，3(1)

$$L_2=\sum_{x=1}^{M}L(x)F_M$$

$$F_M=\sum_{x=M}^{x}F_x$$

$$F_x=\frac{(k+x-1)!}{x!(k-1)!}q^{-k-x}p^x$$

式中，M 对于高、中、低肥力地分别取值为 19、12、8；$k=D/100p$，$p=1.6$，$D=1.0759E_2$，E_2 为二代卵量，D 为被害蕾数。

天敌攻击率 E 模型

丁岩钦，兰仲雄，陈玉平：天敌—害虫系统中寻找效应数学模型的研究．生态学报，1983，3(2)

$$E=\frac{K}{1+e^{-r(T-T_f)}}\left[1-e^{-\left(\frac{T-T_L}{\delta_1}\right)^2}\right]\left[1-e^{-\left(\frac{T-T_H}{\delta_2}\right)^2}\right]$$

式中，T 为温度；K 为天敌的极限攻击值；r 为天敌的内禀攻击率；T_f，T_L 和 T_H 分别为天敌攻击的最适宜温度、最低临界温度和最高临界温度；δ_2 和 δ_2 分别为两临界温度与攻击系数迅速下降点温度之间的变化幅度。

种群与有毒物质的相互作用模型

Hallam T G，Luna J T：种群与有毒物质的相互作用模型中的消亡与持续　Ecological Modelling，1983/1984，22

(1) 种群与毒物生态系统的改良史密斯模型：

$$dx/dt = x[(r_0 - r_1c_0)B(c + r_0 - a) - acx]/[B(c + r_0 - a) + ax] \quad (1)$$

$$dc_0/dt = a_1c_E + d_1\theta\beta a_1^{-1} - l_1c_0 - l_2c_0$$

$$dc_E/dt = u(t) + k_1l_1c_0x - k_1a_1c_Ex - k_2c_E$$

式中，状态变量 x，c_0 和 c_E 分别代表种群中个体数量、有机体中的有毒物浓度、环境中的有毒物浓度；$u(t)$ 是有毒物输入量，其他量是常数。

(2) 资源消耗与有毒物的交互作用：

使用下面的简化形式常常是有效的：

$$dc_E/dt = -k_2c_E + u(t)$$

莱斯利类型的子模型：

用 $f=f(t)$ 表示资源输入系统的速率，则莱斯利类型的一个资源消耗模型是：

$$dx/dt = x(r_0 - r_1c_0 - \alpha x/a)$$

$$da/dt = f - \gamma ax$$

定理：对等式(1)，假设 $\lim_{t\to\infty} u(t) = u(\infty)$，并假设 $\lim_{t\to\infty} f(t) = f(\infty)$ 是正值，如果 $r_0 < r_1c_0(\infty)$，则种群中的消费者就会灭绝，如果 $r_0 > r_1c_0(\infty)$，则这些消费者数量将是稳定的。此外，模型的每个方案往往都受下列式子的限制：

$$x(\infty) = \{f(\infty)[r_0 - r_1c_0(\infty)]/\alpha\gamma\}^{1/2}$$

$$a(\infty) = \{\alpha f(\infty)/\gamma[r_0 - r_1c_0(\infty)]\}^{1/2}$$

$$c_0(\infty) = d_1\theta\beta/a_1(l_1 + l_2) + a_1u(\infty)/k_2(l_1 + l_2)$$

$$c_E(\infty) = u(\infty)/k_2$$

莱斯利矩阵模型

Grant W E, Fraser S O, Isakson K G：脊椎动物杀虫剂对非目标野生动物数量的影响：用模型进行评价. Ecological Modelling, 1983/1984, 21

$$\underset{\sim}{M}\,\underset{\sim}{v}(t) = \underset{\sim}{v}(t+1)$$

式中，
$$\underset{\sim}{M} = \begin{bmatrix} f(0) & f(1) & f(2) & \cdots & f(k) \\ p(0) & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & p(1) & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & p(k-1) & 0 \end{bmatrix}$$
，$f(i)$ 是指那些出生于时间 t 和时间 $t+1$ 之间、在时间 $t+1$ 时仍活着的雌性动物的数量，$p(i)$ 是指年龄为 i 的雌性动物在时间 t 时能存活到时间 $t+1$ 时的概率

$$\underset{\sim}{v}(t) = \begin{bmatrix} v(0,t) \\ v(1,t) \\ v(2,t) \\ \vdots \\ v(k,t) \end{bmatrix}$$

式中，$v(i,t)$ 是指在时间 t 时年龄为 i 的雌性动物数量，但在时间 t 时的数量少于在 $t+1$ 时的数量。

化学药品在空气、土壤和水的界面间动态均衡分布的微分方程

风险评价——对有害环境的化学药品的已暴露的和潜在的影响的分析与综合评估摘要. Ecological Modelling, 1983/1984, 22

(1) 浓度方程：

$$\frac{dc_A(t)}{dt} = -k_Ac_A(t) - k_{AW}c_A(t) - k_{ASo}c_A(t) + k_{SoA}c_{So}(t)$$

$$\frac{dc_W(t)}{dt} = -k_Wc_W(t) - k_{WA}c_A(t) + k_{AW}c_A(t)$$

$$\frac{dc_{So}(t)}{dt} = -k_{So}c_{So}(t) - k_{SoA}c_{So}(t) + k_{ASo}c_A(t)$$

(2) 相对质量方程：

$$\frac{dM_A}{dt} = -k_AM_A - k_{AW}M_A + k_{WA}M_W - k_{ASo}M_A + K_{SoA}M_{So}$$

$$\frac{dM_W}{dt} = -k_WM_W - k_{WA}M_A + k_{AW}M_A$$

$$\frac{dM_{So}}{dt} = -k_{So}M_{So} - k_{SoA}M_{So} + k_{ASo}M_A$$

(3) 在稳定状态下的相对输入量方程：

$$\frac{Q_A}{Q_A + Q_W + Q_{So}} = P_A\frac{Q_W}{Q_A + Q_W + Q_{So}} = P_W\frac{Q_{So}}{Q_A + Q_W + Q_{So}} = P_{So}$$

式中，$c_A(t)$，$c_W(t)$ 和 $c_{So}(t)$ 分别表示空气、水、土壤中的化学药品的浓度，M_A，M_W 和 M_{So} 分别表示空气、水、土壤中的化学药品的相对量，Q_A、Q_W 和 Q_{So} 分别表示在稳定状态下，空气、水、土壤中的化学药品的相对输入量；k_A，k_W 和 k_{So} 分别表示空气、水、土壤中的化学药品的衰退系数；k_{AW} 和 k_{ASo} 分别代表从空气到水再到土壤的传递系数；k_{WA} 代表从水到空气的传递系数；k_{SoA} 代表从土壤到空气的传递系数。

抗虫性指标 K

庞雄飞，梁广文，曾玲：昆虫天敌作用的评价　生态学报，1984，4(1)

$$K = I'_{(f)}\left(1-\frac{a}{S}\right)\left(1-\frac{f}{P_F P}\right)N_0$$

式中，$I'_{(f)}$ 为当地作物品种上害虫的数量发展趋势；N_0 为调查当地为害前一世代的害虫基数；f 为生殖率下降数；a 为存活率下降数；S 为存活率；P_F 为达到标准卵量百分率；P 为雌虫占成虫总数的百分率。

细菌活泼发育区半径 r

王修垣，周培瑾：胜利油田三区注水层微生物的活动　生态学报，1984，4(2)

$$r = \sqrt{\frac{V}{\pi hm\eta}}$$

式中，V 位菌量最高范围的排液量；h 为注水层厚度；m 为注水层的孔隙度；η 为水的驱油系数。

两种天敌与一种害虫相互作用模型

兰仲雄，丁岩钦，陈玉平：天敌-害虫系统中两种天敌与一种害虫相互作用形式的几个数学模型　生态学报，1985，5(1)

模型 1：

$$\begin{cases} N_{t+1} = N_t f_0(N_t)[1 - p_1(P_t) - p_2(Q_t)] \\ P_{t+1} = c_1 N_t p_1(P_t) \\ Q_{t+1} = c_2 N_t p_2(Q_t) \end{cases}$$

模型 2：

$$\begin{cases} N_{t+1} = f_0(N_t)N_t[1 - p_1(P_t)][1 - p'_2(Q_t)] \\ P_{t+1} = c_1 N_t p_1(P_t) \\ Q_{t+1} = c_2 N_t[1 - p_1(P_t)][p'_2(Q_t)] \end{cases}$$

模型 3：

$$\begin{cases} N_{t+1} = N_t f_0(N_t)[1 - p_1(P_t)][1 - p_2(Q_t)] \\ P_{t+1} = N_t\left[p_1(P_t) - \frac{b}{a+b}p_1(P_t)p_2(Q_t)\right] \\ Q_{t+1} = \left[p_2(Q_t) - \frac{a}{a+b}p_1(P_t)p_2(Q_t)\right] \end{cases}$$

模型 4：

$$\begin{cases} N_{t+1} = N_t f_0(N_t)[1 - p_1(P_t)] \\ P_{t+1} = c_1 N_t p_1(P_t)[1 - p'_2(Q_t)] \\ Q_{t+1} = c_2 N_t p_1(P_t) p'_2(Q_t) \end{cases}$$

模型 5：

$$\begin{cases} N_{t+1} = N_t f_0(N_t)[1 - p_1(P_t)][1 - p_2(Q_t)] \\ P_{t+1} = c_1 N_t p_1(P_t)[1 - p_2(Q_t)] \\ Q_{t+1} = c_2 N_t[p_2(Q_t) + P_t p_{21}(Q_t)] \end{cases}$$

式中，带下标的 N，P，Q 分别表示在 t+1、t 世代的害虫和两种天敌的数量和密度；$f_0(N_t)$表示害虫种群每个个体的增长率；$p'_2(Q_t)$ 为 Q 对 N 的余存者的作用概率；a，b 表示 P，Q 在多寄生中通过对营养物的竞争，决定出的 P 对 Q 的成活比；$P_{21}(Q_t)$为 Q 对 P 的捕食概率。

土壤中杀虫剂降解的动态模型

L D. Zhang S：土壤中杀虫剂降解过程的动态模型　Ecological Modelling, 1986, 37.

(1) 零阶动态模型：

$$-\frac{dx}{dt} = k$$

(2) 半阶动力学模型：

$$-\frac{dx}{dt} = kx^{0.5}$$

(3) 一阶动力学模型：

$$-\frac{dx}{dt} = kx$$

(4) 米歇利斯动力学模型：

$$-\frac{dx}{dt} = \frac{k_1 x}{k_2 + x}$$

式中，x 是在时间 t 杀虫剂的浓度；k 是一个速率常数；k_1 和 k_2 是米氏常数。

如果杀虫剂能够生物降解，则：

$$-\frac{dx}{dt} = kxm$$

$$\frac{x}{x_0} = \frac{1}{\left(1+\frac{k_4 x_0}{k_3}\right)\exp(k_3 t) - \frac{k_4 x_0}{k_3}}$$

式中，$k_3 = k(m_0 + \lambda x_0)$；$k_4 = -k\lambda$；$m$ 是在时间 t 相关微生物的数量；m_0 是相关微生物的初始数量；x_0 是杀虫剂的初始浓度；λ 是增长常数。

Guderian 函数模型

曹洪法，O. C. 泰勒：二氧化硫剂量与植物急性伤害关系．生态学报，1986，6(2)

$$t = Ke^{-b(c-a)}$$

式中，t 为暴露时间；K 为植物生长年龄；e 为自然对数；a 为植物伤害的污染物临界值；b 为生物因子的总和；c 为污染物的浓度。

森林死亡率（M）

Byrne S V, Wehrle M M, Keller M A：美国北卡罗来纳州山麓地带舞毒蛾对森林连续群落的影响——一个仿真研究．Ecological Modelling, 1987, 35

$$M = AX^3$$

式中，X 是被舞毒蛾吃掉的叶片面积的比例；参数 A 作为树木径级的函数而变化。

六六六在农业生态环境中的行为模型

姚建仁、焦淑贞、钱兹新等：六六六在农业生态环境中的行为．生态学杂志，1987，6(1)

(1) 污染指数 I_p 模型：

$$I_p = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} p_i$$

$$p_i = \frac{C_i}{C_{si}}$$

式中，I_p 为单元要素的污染指数；p_i 为单项的污染指数；C_i 为单项的实测值；C_{si} 为单项的评价标准，即国家规定的卫生标准。

(2) 污染指数 I_{pn} 模型：

$$I_{pn} = p_i Q^{n-1}$$

式中，I_{pn} 为六六六取代后的污染指数；p_i 为开始禁用六六六当年的污染指数；Q 为污染指数的公比；n 为六六六取代的年数。

口蹄疫-野生猪模型

Pech R P, Hone J：澳大利亚野生猪口蹄疫爆发的动力学和控制模型．The Journal of Applied Ecology, 1988, 25

$$dX/dt = (a - b - gN)X - \beta XY + wZ$$
$$dI/dt = \beta XY - (b + gN + \sigma)I$$
$$dY/dt = \sigma I - (\alpha + b + gN + \upsilon)Y$$
$$dZ/dt = \upsilon Y + (a - b - gN - w)Z$$
$$dN/dt = a(X + Z) - (b + gN)N - \alpha Y$$

式中，X 是易患病野生猪的密度；I 是潜伏野生猪的密度；Y 是具有传染性野生猪的密度；Z 是免疫野生猪密度；N 是野生猪整个种群的密度；a 是未患口蹄疫时的出生率；b 是未患口蹄疫时的死亡率；r 是未患口蹄疫时的增长率($=a+b$)；K 是栖息地的承载力；g 是未患口蹄疫时死亡率的密度依赖性部分；α 是仅由口蹄疫引起的死亡率；β 是口蹄疫的传播系数；σ 是从潜伏到传染的变化率；υ 是康复率；w 是免疫力丧失率；c 是人为控制后的死亡率。

可以计算临界密度 K_T，若低于这个密度，口蹄疫将不会存在于这个种群中，即：

$$K_T = (a + \sigma)(\alpha + a + \upsilon)/\beta\sigma$$

杀虫剂在不饱和地区的转移和降解模拟方程

Padilla F, Lafrance P, Robert C et al：模拟考虑温度影响时杀虫剂在不饱和地区的转移和降解．Ecological Modelling, 1988, 44

(1) 饱和-不饱和土壤中溶质转移的对流-扩散一维方程：

$$[\theta_w + \rho^* K_d(T)]\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[\theta_w D_c(\theta_w, T)\frac{\partial C}{\partial z}\right] - w\frac{\partial C}{\partial z} + (C^* - C)\frac{q_w}{\rho_w} - [\theta_w + \rho^* K_d(T)]k(T)C$$

式中，C 是溶解浓度；C^* 是源水中的溶解浓度；θ_w 是水容量；ρ_w 是水密度；T 是温度；ρ^* 是多孔介质的容积密度；k 是第一降解率；K_c 是吸附分配系数；D_c 是水动力扩散系数；w 是水流的 Darcy 速度。

(2) 温度对降解和吸收参数的影响——温度对反应率影响的 arrhenius 方程：

$$k = A\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

式中，k 是速度常数；A 是常数；R 是气体常数；T 是绝对温度；E_a 是活化能量常数。

(3) 反应平衡常数的 Van't Hoff 方程

$$\frac{d(\ln K)}{dT} = \frac{\Delta H}{RT^2}$$

式中，K 是平衡常数；ΔH 是反应热。

温度对使用杀虫剂控制 oryzae 影响的模拟模型

Longstaff B C：温度对使用杀虫剂控制象鼻属 Oryzae（甲虫类：象虫科）的影响的模拟研究 The Journal of Applied Ecology, 1988, 25

(1) 特定年龄的成年个体的生存时段：

$$S_i' = S_i \exp[-c\exp(dT)t]$$

式中，S_i' 是在有杀虫剂的环境中经历了 t 个生理时间单位的第 i 个成年阶段的成年个体的存活率；S_i 是 Longstaff 和 Cuff (1984)模型中特定年龄的成年个体存活期；c 和 d 是估计的参数；T 是温度。

(2) 杀虫剂降解子模型：

完全降解模型：

$$R_t = R_0 \exp\{-k_0 \exp[B(T - T_0)]t\}$$

式中，R_t 是在时间 t 杀虫剂残留的数量；R_0 是杀虫剂使用的数量；k_0 是参考温度 T_0 下，杀虫剂的流失率；B 是描述流失率随温度的变化率的常数。

木薯植物的碳、氮和水分动态模拟

Gutierrez A P, Wermelinger B, Schulthess F et al：非洲木薯害虫的生物学控制分析 I. 木薯植物的碳、氮和水分动力学模拟 The Journal of Applied Ecology, 1988, 25

(1) 光合作用产物的生产和分配：

$$dA/dt = M^* - z(\Delta t,\cdot)M_T + v^*$$

式中，dA/dt 是总吸收率；M^*是时间 dt 中生产的光合作用产物；$z(\Delta t,\cdot)$是每单位植物量的代谢作用消耗率；Δt 是生理期的变化；M_T是所有呼吸组织的干生物量；v^* 是每天的有效储备量。

(2) 氮平衡模型：

$$dA_N / dt = \omega N_r f_N(\cdot) + v_N^*$$

式中，dA_N / dt 是氮的总吸收率；ω 是水压力指数；N_r 是当前根部体积下的有效氮；$f_N(\cdot)$ 是 Frazer-Gilbert 功能反应模型中的氮的译文；v_N^* 是从保留的和衰老的植物部分到生长的植物组织的氮的再分配率

(3) 土壤有效氮的平衡模型如下：

$$N_N(t+\Delta t) = N_N(t) + \alpha_N N_0 + N_A(t) - N^*(t) - v_N^*(t)$$

式中，N_N 是根部体积最大时的总氮量；$\alpha_N N_0$ 是在时间 Δt 从有机物(N_0)中释放出来的氮；α_N 是一个常数；N_A 是在时间 t 使用的氮肥；N^* 是吸收的无机氮；v_N^* 是植物中循环氮。

(4) 水分平衡模型：

水分供应 E_T^*：

$$E_T^* = W_r f(W_r, b_w, s, I_{la}, \Delta t)$$

式中，W_r 是当前根部体积中的水分；b_w 是土壤水分蒸发蒸腾损失的需求量；s 是搜索参数；Δt 是生理期

褐稻虱再猖獗原因的分析模型

高春光，顾秀慧，贝亚维等：褐稻虱再猖獗原因的探讨 生态学报，1988，8(2)

(1) 盲蝽捕食稻虱卵的功能模型：

$$N_a = \frac{N}{8.294 - 0.058N}$$

式中，N_a 为被捕食的卵量；N 为和稻虱卵的密度。

(2) 对害虫-天敌系统的影响　杀虫剂选择性指数模型：

$$P = \frac{天敌LD_{50}}{害虫LD_{50}} - 1$$

式中，LD_{50} 为致死中量。若 $P=0$，该种杀虫剂无选择性；$P<0$，该种杀虫剂是负选择性；$P>0$，该种杀虫剂有选择性。

杀虫剂效能模拟模型

Schaalje G B, Stinner R L, Johnson D L：模拟杀虫剂效能实验中杀虫剂对昆虫种群的影响 Ecological Modelling, 1989, 47

(1) 杀虫剂效力模型

$$\frac{dc}{dt} = f(c,t)$$

$$\frac{dx}{dt} = g(c,x,t) - h(x,t)$$

(2) 功能方程：

$$\lambda(t) = \lambda_0(t) + \lambda_1\left\{x_0\exp(-\beta t) + \frac{\mu C_0}{\beta - \alpha}[\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)]\right\}$$

式中，c 是环境中杀虫剂的浓度；x 是个体中残留的杀虫剂的数量；t 是时间；λ 是危险性函数，已知个体已经存活到 t 时间，当乘以 dt 时，函数给出在$(t,t+dt)$时间中死亡的条件概率；f, g 和 h 是适当的沉积降解、吸收和清除函数；$\lambda_0(t)$是对应于非杀虫剂引起的死亡率的危险性函数；λ_1 是特定时间的死亡危险性和同一

时间昆虫体内残留杀虫剂数量之间的线性相关系数；x_0 是施用杀虫剂时被昆虫吸入的数量；c_0 是环境中杀虫剂的初始浓度；μ、α 和 β 分别是杀虫剂在环境中降解、被昆虫吸入和从昆虫体内清除的瞬时速率系数。

(3) 死亡时间的累积分布函数：

$$P(t)=1-\exp\left\{-\lambda_0 t-\lambda_1 x_0\frac{1-\exp(-\beta t)}{\beta}-\frac{\lambda_1\mu c_0}{\beta-\alpha}\cdot\left[\frac{1-\exp(-\alpha t)}{\alpha}-\frac{1-\exp(-\beta t)}{\beta}\right]\right\}$$

基本的疟疾模型

Vandermeer J, Power A：中美地区发育矮小的玉米系统的一般模型　Ecological Modelling, 1990, 52

$$\frac{dI_1}{dt}=(N_1/N_2)bf_2I_2(1-I_1)-\mu_1I_1$$

$$\frac{dI_2}{dt}=bf_1I_1(1-I_2)-\mu_2I_2$$

式中，I_1 是被感染的人口比例；I_2 是被感染的蚊子种群比例；b 是蚊子的叮咬率；f_1 和 f_2 是有传染性的被感染个体的比例；μ_1 是人群的康复率；μ_2 是蚊子种群的死亡率；N_1 和 N_2 分别是人和蚊子的种群密度。

疾病复制率为：

$$R=(N_1/N_2)b^2f_2f_1/\mu_1\mu_2$$

污染预测模型

张曲明，王毅：关于矿物油对土壤污染的预测．生态学杂志，1991，0(1)

(1) 残留量模型：

$$W_n-C_0K^n+RK\frac{1-K^n}{1-K}$$

式中，W_n 为 n 年内的残留量；C_0 为区域背景值；R 和 K 为年输入量和残留率。

(2) 土壤矿物油浓度模型：

$$C_i=C_0+nRK_c$$

$$K_c=1-P\frac{1-Q^n}{1-Q}$$

式中，C_i 为第 i 年末土壤矿物油浓度；P、Q 为净化参数

棉花叶面积损失模型

吴孔明：朱砂叶螨为害棉花的叶面积损失．生态学杂志，1991，10(4)

(1) 棉叶面积损失 $S_L(t)$ 模型：

$$S_L(t)=S(M(t))+S_T(t)$$

式中，$S_T(t)$ 为受害棉株 t 时叶面积和对照棉株实测叶面积的差值，表示螨害所导致棉叶生长量的减少；$S(M(t))$ 为叶螨取食 $M(t)$ 螨时所造成棉叶失绿、坏死累积的斑点面积。

(2) 受害棉叶叶绿素含量损失 Y 模型：

$$Y=a\left(1-b^{\frac{M(t)}{S(t)}}\right)$$

式中，a 为未受害棉叶叶绿素含量；b 为棉叶耐螨害能力；$S(t)$ 为受害棉株叶片生长函数，故 $\frac{M(t)}{S(t)}$ 表示螨害程度。

条锈病流行的定量分析模型

陈万权，谢水仙，陈杨林：小麦品种的感病性与条锈病流行关系的定量分析．生态学杂志，1991，10(6)

(1) Logistic 方程：

$$\frac{x}{1-x}=\frac{x_0}{1-x_0}e^{rt}$$

式中，x_0 为初始病情；x 为观察时的病情；t 为观察时间；r 为表观侵染速率。

(2) Gompertz 方程：

$$x=\exp[-B\exp(-kt)]$$

式中，k 为流行速率；$B=-\ln x_0$ 为位置参数；其他同上。

温度对杀虫剂降解率影响的动态模型

Zhang S, Liu D, Wang Z et al：描述温度对土壤中杀虫剂降解率的影响的动力学模型　Ecological Modelling, 1993, 70

$$-\frac{dx}{dt}=k_1x+k_2x^2$$

$$k_1=\begin{cases}\dfrac{4(T-c)(h-T)}{(h-c)^2}A_1^*\exp\left(-\dfrac{E^*}{RT}\right)+ \\ A_1\exp\left(-\dfrac{E}{RT}\right) & (c\leqslant T\leqslant h) \\ A_1\exp\left(-\dfrac{E}{RT}\right) & (T<c \quad 或 \quad T>h)\end{cases}$$

$$k_2=\begin{cases}\dfrac{4(T-c)(h-T)}{(h-c)^2}A_2^*\exp\left(-\dfrac{E^*}{RT}\right)+ \\ A_2\exp\left(-\dfrac{E}{RT}\right) & (c\leqslant T\leqslant h) \\ A_2\exp\left(-\dfrac{E}{RT}\right) & (T<c \quad 或 \quad T>h)\end{cases}$$

式中，x 是在时间 t 时杀虫剂的浓度；k_1 是绝对温度 T 下的第一速度常数；k_2 是绝对温度 T 下的第二速度常数；c 是降解杀虫剂的微生物的最低生长温度；h 是这些微生物的最高生长温度；A_1^* 和 A_2^* 是与微生物生长过程的前指数因子相关的常数；E^* 是微生物生长过程的活化能量；R 是气体常数；A_1 和 A_2 是与杀虫剂非生物降解过程的前指数因子相关的常数；E 是杀虫剂非生物降解过程的活化能量。

舞毒蛾种群动态模型

Wilder J W, Voorhis N, Colbert J J et al：含有三个变量的舞毒蛾种群动态模型 1994,72.

$$\frac{dG}{dt}=c_0-c_1G+\alpha c_2\frac{GF}{1+\frac{c_2}{c_3}F}-c_4\frac{GN}{1+\frac{c_4}{c_8}G}$$

$$\frac{dF}{dt}=c_9+\left(c_5-\frac{c_9+c_5c_6}{c_6^2}F\right)F-c_2\frac{GF}{1+\frac{c_2}{c_3}F}$$

$$\frac{dN}{dt}=c_{10}-c_7N+\beta c_4\frac{GN}{1+\frac{c_4}{c_8}G}$$

式中，G 是舞毒蛾生物量密度；F 是植物生物量密度；N 是天敌的生物量密度，它们的单位都是 $g\cdot hm^{-2}$；t 是以年为单位的时间；c_0 是舞毒蛾的迁入率；c_1 是舞毒蛾本底死亡率和迁出率的组合；c_2 是舞毒蛾对植物的搜索率；c_3 是舞毒蛾对植物的消耗率；c_4 是舞毒蛾对天敌的搜索率；c_5 是植物的最大相对生长率；c_6 是植物的承载力；c_7 是天敌本底死亡率和迁出率的组合；c_8 是天敌对舞毒蛾的消耗率；c_9 是植物的最小生长率；c_{10} 是天敌的迁入率；α 是植物转换成舞毒蛾生物量的转化效率；β 是舞毒蛾生物量转换成天敌生物量的转换效率

累计相对病死频率 $F(x)$

叶恭银，胡萃：茶尺蠖感染核型多角体病毒后病死时间分布的数学模拟 生态学报，1994，14(2)

$$F(x)=1-\exp\left[-\left(\frac{x}{V}\right)^m\right]$$

式中，x 为正规化病死时间。

杀虫剂参数估算模型

Diekkrüger B, Nörtersheuser P, Richter O：利用 HERBSIM 和 SIMULAT 模拟肥土生境的杀虫剂动态 Ecological Modelling, 1995, 81

总的退化率是描述温度 $k_1(T)$ 和水容量 $k_2(\theta)$ 的影响的函数的产物，可表达为：

$$k_1(T)=h(T-T_s)r_{max}\frac{T_{max}-T}{T_{max}-T_{opt}}\times \exp\frac{x(T-T_{opt})}{T_{max}-T_{opt}}$$

$$x=\frac{1}{400}W^2\left(1+\sqrt{1-\frac{40}{W}}\right)^2$$

$$W=(Q_{10}-1)(T_{max}-T_{opt})$$

$$h(T-T_s)=1 \qquad (T\geqslant T_s\wedge T\leqslant T_{max})$$

$$h(T-T_s)=0 \qquad (T<T_s\vee T>T_{max})$$

$$k_2(\theta)=\left(\frac{\theta}{\theta_{crit}}\right)^b\exp\left[-\left(\frac{\theta}{\theta_{crit}}\right)^b\right]$$

式中，T 是温度(℃)；T_{opt} 是最适宜的温度（℃）；T_s 是最低温度（℃）；T_{max} 是最高温度（℃）；r_{max} 是最佳温度(d^{-1})下的最大退化率；Q_{10} 是曲线的斜率；θ 是相对饱和度；θ_{crit} 是最优饱和度；b 是指数。

森林有害物扩散模拟模型

Wilder J W, Christie I, Colbert J J：模拟二维空间对森林有害物扩散和管理的影响 Ecological Modelling, 1995, 82

$$\frac{\partial G}{\partial t}=D_G\left(\frac{\partial^2 G}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 G}{\partial y^2}\right)+c_0-c_1G+$$

$$\alpha c_2\frac{GF}{1+\frac{c_2}{c_3}F}-c_4\frac{GN}{1+\frac{c_4}{c_8}G}$$

$$\frac{\partial F}{\partial t}=c_9+\left(c_5-\frac{c_9-c_5c_6}{c_6^2}F\right)F-c_2\frac{GF}{1+\frac{c_2}{c_3}F}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t}=D_N\left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 N}{\partial y^2}\right)+c_{10}-c_7N-\beta c_4\frac{GN}{1+\frac{c_4}{c_8}G}$$

式中，G 是舞毒蛾生物量密度；F 是植物生物量密度；N 是天敌的生物量密度；它们的单位都是 $g \cdot hm^{-2}$；t 是以年为单位的时间；c_0 是舞毒蛾的迁入率；c_1 是舞毒蛾本底死亡率和迁出率的组合；c_2 是舞毒蛾对植物的搜索率；c_3 是舞毒蛾对植物的消耗率；c_4 是舞毒蛾对天敌的搜索率；c_5 是植物的最大相对生长率；c_6 是植物的承载力；c_7 是天敌本底死亡率和迁出率的组合；c_8 是天敌对舞毒蛾的消耗率；c_9 是植物的最小生长率；c_{10} 是天敌的迁入率；α 是植物转换成舞毒蛾生物量的转化效率；β 是舞毒蛾生物量转换成天敌生物量的转换效率。

植物病扩散模型

Scherm H：模拟植物病传播中的传染速度。Ecological Modelling, 1996, 87

$$\frac{dy}{dt}=\frac{1}{s}\frac{d}{ds}\left[K(s)s\frac{dy}{ds}\right]+ry(1-y)$$

式中，$y(s,t)$ 是在时间 t 半径 s 内生病组织的密度(例如每棵植物生病叶片的数量)，$K(s)$ 是扩散系数，r 是表面感染率。

Richardson 的剧烈大气扩散理论预测 $K(s)\propto s^{4/3}$，可导致：

$$\frac{dy}{dt}=\frac{p_1}{s}\frac{d}{ds}\left(s^{7/3}\frac{dy}{ds}\right)+ry(1-y)$$

式中，p_1 是参数。

$K(s)$ 的另一个关系是 $K(s)\propto s$，它可导致：

$$\frac{dy}{dt}=\frac{p_2}{s}\frac{d}{ds}\left(s^2\frac{dy}{ds}\right)+ry(1-y)$$

式中，p_2 是参数。

寄主-拟寄生物模型

Mills N J, Getz W M：模拟有害昆虫的生物学控制——讨论寄主-拟寄生物模型。Ecological Modelling, 1996, 92

$$N_{t+1}=\lambda N_t g(D_{t+1})f(S_{t+1},P_t)$$

$$P_{t+1}=cS_{t+1}[1-f(S_{t+1},P_t)]$$

式中，N_t 和 P_t 分别是第 t 代中宿主和拟寄生物的群体丰富度；λ 是考虑到宿主性别比、雌宿主生育力的平均值和全部密度依赖性死亡率的宿主的净再生率；c 反映了拟寄生物宿主身上出现的雌性拟寄生物的平均数量；D_{t+1} 和 S_{t+1} 是当自我调节和拟寄生物攻击发生作用时，在特定点上寄主种群的密度；$f(.)$ 是每一代中摆脱拟寄生物的宿主比例；$D_{t+1}=F_D(N_t,P_t)$；$S_{t+1}=F_S(N_t,P_t)$。

功能反应如下：

$$g(N)=aN+abV(n)/N$$

式中，a 表示"观察区域"或者说在单个拟寄生物的一生中能够覆盖的宿主生存环境的面积；b 表示聚合度；$V(N)$ 是宿主地块密度的变化；n 是任意选择的地块的相应密度。

杀虫剂对 lumbricid 种群的影响评价模型

Baveco J M, Roos A M：杀虫剂对 lumbricid 种群的影响评价——基于个体的建模方法。The Journal of Applied Ecology, 1996, 33

(1) 恒定压力：

假设对于一个经历了密度依赖性和密度无关性死亡的种群，下面分别是恒定的和年龄依赖性的背景死亡率：

$$1=\int_{\tau}^{\infty}e^{-\mu_1 N^* a}S_{0(a)}r_m[l_m-(l_m-l_b)e^{-\gamma a}]^2 da$$

$$1=\int_{\tau}^{\infty}e^{-\mu_1 N^* a}S_{(a)}r_m[l_m-(l_m-l_b)e^{-\gamma a}]^2 da$$

式中，r_m 是每单位表面积上的最大繁殖率；γ 是生长率的量度；l_m 是年长个体最大可以到达的尺寸；l_b 是出生时的长度；μ_1 是密度依赖性死亡率；N^* 是平衡密度；$S_{(a)}=\left(\frac{1-x_1a}{1+x_2a}\right)^k$，$S_{(a)}$ 是存活率函数，x_1，x_2 和 k 是参数，是个体年龄；τ 是幼年期的持续时间；$S_{0(a)}=\exp(-\mu_0 a)$，μ_0 是恒定背景死亡率。

(2) 动力学压力：

杀虫剂通常用短半衰期来描述，对于与杀虫剂的环境浓度成线性比例关系的动力学压力，受压维持力

和繁殖能力常数 ξ 和 ω 有下面的动力学值：

$$\xi_{stressed(t)} = \xi_{unaffected}(1 + [tox]_0 e^{-\delta t})$$

$$\omega_{stressed(t)} = \omega_{unaffected}(1 + [tox]_0 e^{-\delta t})$$

式中，$[tox]_0$ 指初始压力大小；δ 是指数式衰减率常数。

对于常数和年龄依赖性背景死亡率，分别有：

$$1 = \int_{\tau}^{\infty} e^{-r(a-\tau_0)} S_{0(a)} r_m [l_m - (l_m - l_b) e^{-\gamma a}]^2 da$$

$$1 = \int_{\tau}^{\infty} e^{-r(a+\tau_0)} S_{(a)} r_m [l_m - (l_m - l_b) e^{-\gamma a}]^2 da$$

式中，r 是指数式种群生长率；τ_0 是茧状态的持续期。

野生生物疾病控制模型

Barlow N D：野生生物疾病控制的生态学——修正后的简单模型 The Journal of Applied Ecology, 1996,33

（1）死亡率的密度相关性：

$$dH/dt = H[a - b - r(H/K)^{\Theta}] - \alpha Y$$

$$dM/dt = \beta Y(H - M - Y) - M[v + b + r(H/K)^{\Theta}]$$

$$dY/dt = vM - Y[\alpha + b + r(H/K)^{\Theta}]$$

（2）个体增殖的密度相关性：

$$dH/dt = H[a - b - r(H/K)^{\Theta}] - \alpha Y$$

$$dM/dt = \beta Y(H - M - Y) - M(v + b)$$

$$dY/dt = vM - Y(\alpha + b)$$

式中，H 是总密度；M 是潜在动物(正孵卵的)的密度；Y 是传染性的动物的密度；a 是密度无关性(最大)出生率；b 是密度无关性(最小)死亡率；r 是固有增长率；K 是没有疾病时平衡种群密度的承载力；Θ 是种群增长曲线的形状参数；β 是疾病的传播系数；v 是正孵卵的动物变得具有传染性的速率；α 是疾病引起的额外死亡率。

（3）没有传播发生时，疾病的基本增殖率公式：

1）密度相关性死亡率：

$$R_0 = \beta Kv/[(v + a)(\alpha + a)]$$

2）密度相关性再生率：

$$R_0' = \beta Kv/[(v + b)(\alpha + b)]$$

3）两者的密度相关性：

$$R_0' = \beta Kv/\{[v + (a - b)/2][\alpha + (a + b)/2]\}$$

疾病的基本繁殖率是指在一个易感种群中，每个新感染的动物产生的新感染个体的数量。

农药污染对土壤动物呼吸代谢的影响模型

王振中，张友梅：有机磷农药对土壤动物群落结构的影响研究 生态学报，1996，16(4)

呼吸强度 Q 模型：

$$Q = hk/mt = \frac{\frac{V_g 273}{T'} + V_1 a}{P_0} - h/mt$$

式中，h 为压力计读数；k 为反应瓶常数；V_g 为反应瓶的气体体积；V_1 为反应瓶中的液体体积；T' 为水浴的绝对温度；P_0 为标准大气压；a 为一标准大气压下，温度为 T' 时气体在反应瓶中的溶解度。

病原菌感染的种群模型

刘登义：病原菌与自然植物种群Ⅱ病原菌与植物种群生物学 生态学报，1996，16(6)

$$H_{t+1} = H_t[1 + b(1 - r_p) - r_f - d_H]$$

$$D_{t+1} = D_t(1 - d_D) + H_t(r_f + b_{rp})$$

式中，"H"代表健康植株数；"D"代表染病植株数；"b"代表苗成活率；r_f、r_p 分别代表花期感染率和前花期感染率；d_H、d_D 分别为健康植株和染病植株的死亡率；t，t+1 代表世代。

再植和康复的流行病学模型

Holt J, Jeger M J, Thresh J M et al：应用于非洲木薯花叶病毒症的整合了带菌者种群动力学的流行病学模型. The Journal of Applied Ecology, 1997, 34

$$\frac{dX}{dt} = rX\left(1 - \frac{X + Y}{K}\right)\frac{X}{X + \theta Y} - k_1 XV - gX + sY$$

$$\frac{dY}{dt} = rY\left(1 - \frac{X + Y}{K}\right)\frac{\theta Y}{X + \theta Y} + k_1 XV - aY - gY - sY$$

$$\frac{dU}{dt}=b(U+V)\left[1-\frac{U+V}{m(X+Y)}\right]-k_2YU-cU$$

$$\frac{dV}{dt}=k_2YU-cV$$

式中，X 和 Y 分别是健康的和患病的植物的丰富度；U 和 V 是非传染性和传染性带菌者的丰富度；K 是植物的最大密度；r 是健康的和患病的植物的再植率；g 是木薯植物被铲除和收割的速率；a 是由于 ACMV 传染病影响的植物的损失率；m 是带菌者的最大丰富度；b 是假设受带菌者的最大丰富度约束的带菌者的出生率；c 是带菌者的死亡率；k_1 是健康植物的接种率；k_2 是非传染性带菌者的病毒获取率；θ 是由于植物患病而使繁殖中断所引起的淘汰率；s 是患病植物的康复率。

矿化作用动态模型

Fomsgaard I S：模拟土壤表面和表面以下低浓度杀虫剂的矿化作用动力学. Ecological Modelling, 1997, 102

$$P=100[1-ae^{-tk_1}-(1-a)e^{-tk_2}]$$

式中，P 是在时间 t 被矿化的杀虫剂浓度(% ^{14}C 当作 $^{14}CO_2$)；k_1、k_2 是前两个过程的退化率常数；t 是天数表示的时间；a 是被第一过程转化成 $^{14}CO_2$ 的杀虫剂的总量部分。

(1) Logistic 模型如下：

$$P=c_0-\frac{c_0+x_0}{1+\frac{x_0}{c_0}e^{k_1(c_0+x_0)t}}$$

式中，c_0 是被第一步新陈代谢转化成 $^{14}CO_2$ 的杀虫剂的总浓度；x_0 是需要产生初始种群密度的培养基(杀虫剂)的数量；k 是退化率常数。

(2) 第一步矿化作用模型如下：

$$P=c_0\left(1+\frac{k_1e^{-k_2t}-k_2e^{-k_1t}}{k_2-k_1}\right)$$

媒体传布的菌病种群模型

刘登义：病原菌与自然植物种群Ⅲ. 病原军与自然植物的共进化及媒体传布的菌病的种群模型. 生态学报, 1997, 17(1)

(1) 菌病流行的简单模型：

$$\frac{dy}{dt}=ry(1-y)$$

式中，y 为寄主植物发病率；r 为病原菌的传染系数。

(2) 媒体传布的菌病的种群模型：

$$\frac{dy}{dt}=\beta Y'X-(b+a)Y$$

式中，X 为传媒生物个体数；Y' 为感受性寄主植物个体数；Y 为寄主植物种群个体数；β 为病原菌传布系数；b 为寄主植物自然死亡率；a 为病菌导致的寄主植物死亡率。

害虫种群复活的模拟模型

Trumper E V, Holt J：模拟使用杀虫剂后更换田地导致的害虫种群的复活。The Journal of Applied Ecology, 1998, 37

(1) 模型中看作是两个临近的田地：

$$\frac{dN_1}{dt}=r_1N_1\frac{K-N_1}{K}-aP_1N_1-uN_1+uN_2-jN_1e^{-st}$$

$$\frac{dN_2}{dt}=r_2N_2\frac{K-N_2}{K}-aP_2N_2-uN_2+uN_1$$

式中，r, N 和 K 分别是被捕食者种群的固有增长率、密度和承载力；u 是每个被捕食者的扩散率；a 是被捕食者的消费率；P 是捕食者密度；名词 $-jN_1e^{-st}$ 表示杀虫剂的影响，j 是被杀虫剂杀死的害虫的初始比例，s 是残留的死亡率影响下的衰退率，t 是时间，下标表示田地 1 和 2。

(2) 田地 1 和 2 中的捕食者动力学模型：

$$\frac{dP_1}{dt}=faP_1N_1-cP_1-vP_1+vP_2-hP_1e^{-st}$$

$$\frac{dP_2}{dt}=faP_2N_2-cP_2-vP_2+vP_1$$

式中，f 是被捕食者到捕食者的转换效率；c 是捕食者的死亡率；h 是被杀虫剂杀死的捕食者昆虫的初始比例；v 是捕食者的扩散率。

小麦条锈病发生规律预测模型

谢成君：宁南山区小麦条锈病发生规律预测预报研究。生态学杂志，1998，17(1)

(1) 模糊综合决策预测模型：

评判模型：

模型 1：主要因素肯定型：

$$M_1=\bigcup_{i=1}^{m}\left[\mu \underset{\sim}{X}(x_j)\vee r_{k1}\right]$$

模型 2：主要因素决定型：

$$M_2=\bigcup_{i=1}^{m}\left[\mu \underset{\sim}{X}(x_j)\wedge r_{kl}\right]$$

模型3：主要因素突出型：

$$M_3=\bigcup_{i=1}^{m}\left[\mu \underset{\sim}{X}(x_j)\cdot r_{kl}\right]$$

模型4：因素求和型：

$$M_4=\sum_{i=1}^{m}\left[\mu \underset{\sim}{X}(x_j)\wedge r_{kl}\right]$$

模型5：加权平均型：

$$M_5=\sum_{i=1}^{m}\left[\mu \underset{\sim}{X}(x_j)\cdot r_{kl}\right]$$

模型6：综合决策型：

$$M_6=\frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5}M_i$$

式中，x_1为平凉地区条锈病流行程度级别；x_2为当地4月份平均气温；x_3为4~5月降水量；x_4为感病品种种植面积；$x_1,\cdots,x_4$为预报因子。

(2) 柯布-道格拉斯预测模型：

$$Y=0.3117X_1^{0.5154}X_2^{0.5782}X_3^{0.1361}$$
$$R=0.8828^{**},\quad S=\pm0.2813$$

式中，Y为流行程度预测值。

扁虱种群动态模型

Buskirk J V, Ostfeld R S：生境异质性与分散的、局部的思莱姆关节炎的风险　Ecological Applications, 1998 8(2)

$$L_{t+1}=fR(Au_t+Ai_t)$$

$$Nu_{t+1}=sPL_{t+1}(1-c)$$

$$Ni_{t+1}=sPL_{t+1}c$$

$$Au_{t+1}=sPNu_t(1-c)$$

$$Ai_{t+1}=sP(Ni_t+cNu_t)$$

式中，L,N,A分别代表雌性扁虱在稚虫、幼虫及成虫三个阶段的密度，每个阶段被感染的和未被感染的种群个体数分别用以大写的阶段符号作下标的u和i来表示；f表示成活下来的并且具有生育能力的成年雌性数；s是每年扁虱的幸存者；c是指脊椎动物的储主能力。

(1) 成年扁虱找到寄主的概率(R)决定于鹿的密度(D)：

$$R=1-\exp(-\delta D)$$

式中，δ是决定发现寄主效率的一个常数。

(2) 成年扁虱的密度决定于上年幼虫的密度，它们找到寄主的可能性(P)为：

$$P=1-\exp\left(-\eta\sum^{n}H\right)$$

式中，H是被未成年硬蜱寄生的寄主的密度，n是能够被幼体所利用的寄主的数量，η是一个反应能够发现寄主的效率的常数。

(3) 寄主的储主能力可定义为：

$$c=\gamma r$$

式中，γ是一个被螺旋菌感染的寄主的比例，r是指未被感染的、但当它们寄生在一个寄主身上时又被感染的幼扁虱的比例(传播率)。

$$\gamma=1-\exp(-\varepsilon Ni_{t-1})$$

式中，Ni_{t-1}是上一代被感染的尼莫芙(Nymph)的密度，ε是一个控制反馈过程效率的常数。

预测核事故后果的动态食物链模式与程序

胡二邦，高占荣，张和原等：一个预测核事故后果的动态食物链模式与程序　生态学报，1998，18(4)

(1) 干、湿沉积截获与初始滞留：

1) 干沉积量$A_{dij}(t_e)$模型：

$$A_{dij}(t_e)=V_{dij}\chi_i\frac{1-e^{-\lambda_i\Delta t}}{\lambda_i}$$

$$V_{dij}=V_{dij,max}I_{la\,j}(t_e)/I_{la\,j,max}$$

式中，$A_{dij}(t_e)$为放射性烟云经过某处上方所造成的j类植物i核素的干沉积量；V_{dij}为i核素向j类植物的干沉积速度，$V_{dij,max}$为i核素向j类植物的最大沉积速度，$I_{la\,j}(t_e)$为沉积结束时刻t_e的j类植物的叶面积指数；λ_i为i核素的放射性衰减常数；Δt为放射性烟雨飘过计算区的时间长度。

2) 湿沉积量$A_{wi}(t_e)$模型：

$$A_{wi}(t_e)=\sum_k\frac{8A_{ik}\dot{Q}_i}{\pi ux}\frac{1-e^{-\lambda_i\Delta t_k}}{\lambda_i}e^{-\lambda_i(t_e-t_k)}$$

式中，$A_{wi}(t_e)$ 为事故放射性烟雨尾部离开计算区域时刻 t_e 因烟雨飘过期间发生的下雨过程的时沉积造成 i 核素的总沉积量；Q_i 为 i 核素源强；x 为计算区域距事故源项的下风距离；A_{ik} 为烟雨飘过期间发生的第 K 次降雨过程所对应的 i 核素的冲洗系数；Δt_k 为烟雨飘过期间发生的第 K 次降雨过程的持续时间；t_k，t_{k-1} 分别为第 k 次降雨过程的结束和起始时间。

3）植物对湿沉积核素的截获量 $A_{wij}(t_e)$ 模型：

$$A_{wij}(t_c) = f_{wj}A_{wi}(t_e)$$

$$f_{wj} = \frac{I_{la\,j}S_j}{R}\left[1-\exp\left(\frac{-\ln 2}{3S_j}R\right)\right]$$

式中，fw_j 为 j 类植物的截获份额，S_j 为 j 类植物有效储水能力、R 为放射烟雨飘过期间的降水总量，I_{laj} 为沉积时的 j 类植物叶面积指数。

4）土壤表面的总沉积量 $A_{sij}(t_e)$ 模型：

$$A_{sij}(t_c) = \chi_i V_{dij,\max}\left(1-f_a\frac{I_{la\,j}}{I_{la\,j,\max}}\right)\frac{1-e^{-\lambda_i\Delta t}}{\lambda_i} + (1-f_{wi})k\sum_k\left\{\frac{8A_{ik}\dot{Q}_i}{\pi\,ux}\frac{1-e^{-\lambda_i\Delta t}}{\lambda_i}\times\exp[-\lambda_i(t_e-t_k)]\right\}$$

式中，f_a 为沉积核素种未被截获而到达土壤的份额。

(2) 易位模型：

1）易位因子 $T_r(a)$ 模型：

$$T_r(a) = \frac{\text{收获时在}1\text{m}^2\text{土壤上可食部位中的放射性活度}(\text{Bp}\cdot\text{m}^2)}{\text{沉积时在}1\text{m}^2\text{土壤上叶面滞留的放射性活度}(\text{Bp}\cdot\text{m}^2)}$$

2）收割时 j 类植物可食部位中的放射性核素 i 的浓度 $A_{ij}(t_p)$ 模型：

$$A_{ij}(t_p) = \frac{[A_{dij}(t_c)+A_{wij}(t_e)]T_r(\delta t)}{Y_j}$$

式中，t_p 为收割日期；$\delta t = t_p - t_e$，为沉积结束到收割的时间间隔；Y_j 为 j 类植物的单产。

(3) 因干、湿沉积和易位导致的收割时的浓度：

收割时 j 类植物可食部分中 i 核素的浓度 $A_{ij}(t_p)$ 模型：

$$A_{ij}(t_p) = \frac{[A_{dij}(t_e)+A_{wij}(t_e)]T_r(\delta t)}{Y_j}\times\exp[-(\lambda_w-\lambda_i)\delta t]$$

式中，λ_w 为环境衰减常数。

(4) 入渗与土壤表层的放射性核素浓度：

土壤表层的放射性核素浓度 $A_{sij}(t_e)$ 模型：

$$A_{sij}(t) = A_{sij}(t_e)\exp[-(\lambda_{per}+\lambda_i)(t-t_e)]$$

式中，λ_{per} 为入渗常数。

(5) 根部吸收：

1）土壤根系区域的放射性核素浓度 $A_{rij}(t)$ 模型：

$$A_{rij}(t) = \{A_{sij}(t_e)[1-\exp(-\lambda_{per}(t-t_e))]/L\rho\}\times\exp[-(\lambda_s+\lambda_f+\lambda_i)(t-t_e)]$$

式中，$A_{rij}(t)$ 为沉积时间结束后经 t 时刻在种植 j 类植物的土壤根系区域的土壤中 i 核素的浓度；L 为根系区土壤深度；ρ 为土壤密度；λ_s 为核素通过浸出过程迁移出根系区域造成浓度减少的减少常数；λ_f 为被土壤固着的速率常数。

2）根部吸收浓度 $A_{srij}(t)$ 模型：

$$A_{srij}(t) = B_{vij}A_{rij}(t)f_{g\,j}$$

$$f_{gi} = \frac{\text{沉积结束至}i\text{类植物收割的时间(d)}}{j\text{类植物整个生长期(d)}}$$

式中，$A_{srij}(t)$ 为因根部吸收贡献的植物中 i 核素的浓度；B_v 为植物中放射性核素浓度与土壤中放射性核素浓度之比。

(6) 耕作对土壤表层与根系区核素浓度的影响：

1）耕作时间后浓度 $A'_{sij}(t)$，$A'_{rij}(t)$ 模型：

$$A'_{sij}(t) = \{A_{sij}(t_e)\exp[-(\lambda_{per}+\lambda_i)(t_d-t_e)] + A_{sij}(t_e)[1-\exp(-\lambda_{per})(t_d-t_e)]\times\exp[-(\lambda_s+\lambda_f+\lambda_i)(t_d-t_e)]\}\times f_s\exp[-(\lambda_{per}+\lambda_i)(t-t_G)]$$

$$A'_{rij}(t)=\{A_{sij}(t_e)\exp[-(\lambda_{per}+\lambda_i)(t_d-t_e)]+A_{sij}(t_e)[1-\exp(-\lambda_{per})(t_d-t_e)]\times\exp[-(\lambda_s+\lambda_f-\lambda_i)(t_d-t_e)]\}f_r\times\frac{\exp[-(\lambda_s+\lambda_f+\lambda_i)(t-t_d)]}{L\rho}$$

式中，$A'_{sij}(t)$，$A'_{rij}(t)$分别为在种植有 j 类作物土壤中，耕作后 t 时刻土壤表层与耕作区域内的 i 类核素浓度；大括号 | | 内这一项分别为在耕作时刻土壤表层与根系区内 i 核素的总储量；大括号乘以 f_s 与 f_r 分别为这些总储量因耕田而在表层与根系区内进行再分配、然后以各自的减少速率减少；t_d-t_e 为沉积事件结束至耕作之间的时间间隔。

2）根部吸收对植物可食部分核素浓度的贡献 $A'_{srij}(t_p)$模型：

$$A'_{srij}(t_p)=B_{vij}A'_{rij}(t_p)f_{gj}/f_{rf}$$

式中，$A'_{srij}(t_p)$为 j 类植物收割时植物可时部分中因根部吸收贡献的 i 核素浓度；$A'_{rij}(t_p)$为考虑了沉积事件对根系影响的 j 类作物收割时土壤根系区域中 i 类核素的浓度；f_{rf} 为植物的干重与鲜重之比值。

（7）植物可食部分核素浓度：

1）沉积事件发生在当年耕作前(即考虑耕作的影响)，浓度 $A_{ijT}(t_p)$模型：

$$A_{ijT}(t_p)=A_{ij}(t_p)+A'_{srij}(t_p)$$

$$A'_{srij}(t_p)=\frac{B_{vij}f_{gj}f_r}{f_{rf}L\rho}\{A_{sij}(t_e)\exp[-(\lambda_{per}+\lambda_i)(t_d-t_e)]+A_{sij}(t_e)[1-\exp(-\lambda_{per})(t_d-t_e)]\times\exp[-(\lambda_s+\lambda_f+\lambda_i)(t_d-t_e)]\}\times\exp[-(\lambda_s+\lambda_f+\lambda_i)(t_p-t_d)]$$

式中，$A_{ijT}(t_p)$为收割时 j 类植物中因叶面沉积与根部吸收造成的 i 核素浓度；$A_{ij}(t_p)$,$A'_{srij}(t_p)$分别为叶面沉积与根部吸收两个途径的贡献。

2）沉积发生在耕作之后，作物核素浓度 $A_{ijT}(t_p)$模型：

$$A_{ijT}(t_p)=A_{ij}(t_p)+A_{srij}(t_p)$$

$$A_{srij}(t_p)=\frac{B_{vij}f_{gj}A_{sij}(t_e)[1-\exp(-\lambda_{per})(t_p-t_e)]}{f_{rf}L\rho}\times\exp[-(\lambda_s+\lambda_f+\lambda_i)(t_p-t_e)]$$

（8）动物产品核素浓度：

核素浓度 $C_{mki}(T)$模型：

$$C_{mki}(T)=F_{mki}\sum_{n=1}^{2}\left\{a_{kn}\int_0^T A_{ami}(t)\exp[-(\lambda_{bkn}+\lambda_i)(T-t)]dt\right\}$$

式中，$C_{mki}(T)$ 为 T 时刻 m 类动物中 K 类产品中的 i 核素浓度；$A_{ami}(t)$ 为 t 时刻 m 类动物对 i 类核素的摄入速度；λ_{bkn} 为相应于 K 类动物产品的 n 类生物转移速率的生物衰减常数；a_{kn} 为 K 类动物产品中发生 n 类生物转移的份额；F_{mki} 为 m 类动物食入含 i 核素的食物后转移到 K 类产品的转移系数。

（9）人体食入途径放射性核素摄入率：

人体通过食入途径摄入放射性核素的速率 $A_{Hi}(t)$模型：

$$A_{Hi}(t)=\left\{\sum_j A_{ijT}(t_p)\exp[-\lambda_i(t-t_p)]V_j(t)F_{rj}/P_{ej}\right\}+\left\{\sum_k C_{mki}(t_s)\exp[-\lambda_i(t-t_s)]V_k(t)F_{rk}/P_{ek}\right\}$$

式中，$A_{Hi}(t)$ 为 t 时刻人体对 i 核素的摄入速率；$A_{ijT}(t_p)$为收割时第 j 类植物中 i 核素的浓度；F_{rj}，F_{rk} 分别为 j 类植物与 K 类动物制品食品加工滞留因子；P_{ej}，P_{ek} 分别为 j 类植物与 K 类动物产品的加工效率；$C_{mki}(t_s)$ 为 m 类动物宰割时 (t_s)K 类动物产品中 i 核素的浓度；$V_j(k)$，$V_k(k)$为不同年龄组居民对 j 类植物制品与 K 类动物产品的日消费量。

多金属潜在风险指数 I_r

刘文新，栾兆坤，汤鸿宵：乐安江沉积物中金属污染的潜在生态风险评价．生态学报，1999，19(2)

$$I_r = \sum_{i=1}^{m} E_r^i$$

$$E_r^i = T_r^i C_f^i$$

$$C_f^i = \frac{C_D^i}{C_R^i}$$

式中，C_D^i 为样品实测浓度；C_R^i 为沉积物背景参考值；T_r^i 反映了金属在水相、沉积固相和生物相之间的响应关系。

杆状病毒传染及其造成的经济损失模型

孙刚，国际翔，王振堂：对虾杆状病毒病暴发式大流行的生态机理初步研究 生态学报 1999，19(2)

(1) 杆状病毒在对虾群体内的传染模型：

$$M = vq^{t/\rho-1}N^{-1}$$

式中，M 为虾池内染病虾的比例；v 为虾群中首批感染病毒的个体数；q 为平均分食率；ρ 为传染梯度时差；N 为一个虾池内存虾总数；t 为时间。

(2) 虾病造成的经济损失 y 模型：

$$y = m(S+50)^n$$

式中，S 为虾池密度；m、n 为常数。

控制野猫的数学模型

Courchamp F, Cornell S J：在岛屿上用携带病毒的免疫避孕法控制野猫——一个数学模型 The Journal of Applied Ecology, 2000.37

(1) 疾病-宿主相互作用的标准模型：

$$\frac{dF}{dt} = F(B-M) - i$$

$$\frac{dS}{dt} = -SM + i$$

式中，F 是能繁殖的个体的数量；S 是无法繁殖的个体的数量；B 是出生率；M 是死亡率；i 是感染率(个体由能繁殖到无法繁殖的转变速率)；$F+S=N$，N 是个体总数。

$$B = b - \frac{\varepsilon rN}{K}$$

$$M = m + \frac{(1-\varepsilon)rN}{K}$$

式中，r 是种群的固有增长率；b 和 m 是没使用免疫避孕法时种群的增长率和死亡率；ε 是补偿参数，当 $\varepsilon=1$ 时，密度相关性影响只对出生率有作用，而当 $\varepsilon=0$ 时则只对死亡率有作用。

如果 $\varepsilon=0$，则有：

$$\frac{dF}{dt} = rF\left(1-\frac{F+S}{K}\right) - i$$

$$\frac{dS}{dt} = rS\left(1-\frac{F+S}{K}\right) - bs + i$$

那么，称之为“死亡补偿”。

如果 $\varepsilon=1$，则有：

$$\frac{dF}{dt} = rF\left(1-\frac{F+S}{K}\right) - i$$

$$\frac{dS}{dt} = -mS + i$$

那么，称之为“繁殖补偿”。

(2) i 的三个可能的形式：

1) 物质活动模型：

$$i_{MA} = \beta FS$$

2) 按比例的混合模型：

$$i_{PM} = \beta \frac{FS}{F+S}$$

3) 一般模型：

$$i_f = \frac{\beta FS}{1-f+f(F+S)}$$

式中，β 和 f 是参数。

受侵害白云杉的存活时间分析模型

He F, Alfaro R I：白松象鼻虫对.. Ecological Applications, 2000, 10(1)

(1) 概率密度函数 $f(t)$ 是指在 t 到 $t+\Delta t$ 的时间间隔内白云杉受到白松象鼻虫侵袭的概率 p：

$$f(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{p(t \leqslant T < t+\Delta t)}{\Delta t}$$

(2) 幸存函数 $S(t)$ 是指一棵存活时间长于 t 的树没有受到侵害的概率：

$$S(t) = 1 - F(t)$$

式中，$F(t)$是一个累积概率函数。

(3) 危害函数 $h(t)$是一个条件衰退速度，用以表示

一棵树在 t 到 $t-\Delta t$ 的期间受到侵害的概率(假定该树已活到时间 t)：

$$h(t)=\frac{f(t)}{1-F(t)}=\frac{f(t)}{S(t)}$$

(4) 时间间隔为 4(表示云杉树直到第 5 年才受到侵害)的概率密度函数和幸存函数的对数正态分布分别为：

$$f(t)=\frac{1}{(2\pi)^{1/2}\sigma(t-4)}\times$$

$$\exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{\lg(t-4)-\mu}{\sigma}\right]^2\right\}$$

$$S(t)=1-\Phi\left[\frac{\lg(t-4)-\mu}{\sigma}\right]$$

式中，Φ是标准正态分布函数；μ 和 σ 分别表示用于估测具有抵抗力的和易受侵害的群体的参数.

捕食功能减退率 D_f

徐建祥，吴进才，程遐年等：两种杀虫剂对稻田捕食性天敌集团捕食功能的影响. 生态学报，2000，20(1)

$$D_f=\sum_{i=1}^{n}a_i D_{f_t}$$

式中，D_{f_t} 为 t 时刻天敌种群的功能减退率；a_i 为第 i 类捕食性天敌占该集团总捕食量的份额.

第二十七章　生态管理与恢复生态学

可更新资源管理的矩阵方法

Usher M B：可更新资源管理的矩阵方法，特别针对于选择森林。Journal of Applied Ecology, 1966, 3(2)

(1) 连续时间段中各年龄组的数学模型：

$$\begin{bmatrix} f_0 & f_1 & f_2 & \cdots & f_{n-1} & f_n \\ p_0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & p_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_2 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & p_{n-1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_{t,0} \\ n_{t,1} \\ n_{t,2} \\ n_{t,3} \\ \vdots \\ n_{t,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{t+1,0} \\ n_{t+1,1} \\ n_{t+1,2} \\ n_{t+1,3} \\ \vdots \\ n_{t+1,n} \end{bmatrix}$$

式中，$f_i(i=0,1,2,\cdots,n)$ 指第 i 年龄组中雌株的生育力；$p_i(i=0,1,2,\cdots,n-1)$ 是第 i 年龄组的雌株存活到第 $(i+1)$ 年龄组的概率；$n_{t,i}(i=0,1,2,\cdots,n)$ 是时间 t 在第 i 年龄组的动物的数量；$n_{t+1,i}(i=0,1,2,\cdots,n)$ 是时间 $t+1$ 第 i 年龄组的动物的预测值。

(2) 可更新资源的管理模型：

$$q_{t+1}=Qq_t$$

式中，$q_t=\{q_{t,0},q_{t,1},q_{t,2},\cdots,q_{t,n}\}$ 给出了时间 t 在第 i 类中生物体的数量。

$$Q=\begin{bmatrix} a_0 & k_1 & k_2 & k_3 & \cdots & k_{n-1} & k_n \\ b_0 & a_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & a_2 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_2 & a_3 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & b_{n-1} & a_n \end{bmatrix}$$

式中，a_i 是在本期间内，第 i 类的生物体仍然留在此类中的概率；b_i 是在本期间内，第 i 类生物体转变为第 $i+1$ 类的概率；k_i 是第 i 类中的再生函数。

当 $Qq=\lambda q$ 时，达到稳定，即：

$$Q=\begin{bmatrix} a_0 & c_1(\lambda-1) & c_2(\lambda-1) & c_3(\lambda-1) & \cdots & c_{n-1}(\lambda-1) & c_n(\lambda-a_n) \\ b_0 & a_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & a_2 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_2 & a_3 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & b_{n-1} & a_n \end{bmatrix}$$

式中，c_i 是一个更小生物体数量的函数，这个更小生物体占据了更大生物体的空间，这个更大植物体可能也侵占了相邻生物体的扩展空间；因此对于 $\lambda>1$，生物体数量的增加是潜在侵占度的量度。

最优放牧模型

Swartzman G L, Singh J S：一种使用连续模型的热带草原地区最优放牧策略的动力学程序设计方法 Journal of Applied Ecology, 1974, 11

(1) 假定物种生物量分布与覆盖分布相同，如果 $P_j(t)$ 是时间 t 时的物种生物量，则：

$$P_j(t)=C_j(t)P(t)$$

式中，$C_j(t)$ 是物种 j 占据的总植被覆盖部分；$P(t)$ 是在时间 t 的总植物生物量。如果 $C_8'(t)$ 是无植被覆盖的部分，则 $C_j(t)=C_j'(t)/(1-C_8'(t))$，$C_j'(t)$ 是物种 j 占据的总空间部分。

(2) 定义 g_i 为在放牧制度 i 下所有多年生植物每年的生长量。对于指数 i，i=1，没有被放牧；i=2，轻度放牧；i=3，适度的放牧；i=4，重度放牧。u_i' 表示在放牧制度 i 下多年生草本每年被动物吃掉和变成碎屑的部分，则对于任意放牧制度 i，我们有时间 t：

$$P(t+1)=[P(t)+g_i](1-u_i')$$

且有：$P_j(t+1)=C_j(t+1)[P(t)+g_i](1-u_i')$

转置矩阵 T 可定义为：

$$C_j(t+1)=\sum_{k=1}^{7}C_k(t)t_{kj}$$

式中，t_{kj} 是物种 k 和 j 之间的每年植被覆盖转换率。

根据以上定义，则有：

$$P_j(t+1)=\sum_{k=1}^{7}C_k(t)\,t_{kj}[P(t)+g_i](1-u_i')$$

起始过程的发芽期模型

Campbell R K：道格拉斯冷杉重新造林中考察起始转换过程的生物气候学应用 Journal of Applied Ecology, 1974, 11

$$100w_i^{-1}=a+bX_i$$

式中，w_i 是在第 i 次种植中到达指定的生长事件的天数；X_i 是在第 i 次种植中 w_i 的平均温度；a 和 b 是回归常数。

森林管理模型

Williams B K：自然资源管理中的最佳随机调控．Ecological Modelling, 1982, 16

（1）系统转换的一个通式：

$$x_1(t+1)=g_1(x_1(t),x_2(t),u(t))+z_1(t)$$

$$x_2(t+1)=g_2(x_1(t),x_2(t),u(t))+z_2(t)$$

$$x_3(t+1)=a+bx_3(t)+\varepsilon_t$$

式中，$x_1(t)$、$x_2(t)$ 和 $x_3(t)$ 分别代表胸径、树密度和市场条件；随机影响因素有驱动力向量 $z(t)$ 和市场变量 ε_t，后者表示未来市场的不确定性；$u(t)$ 是指收获量；单步的盈利就是经济报酬 $v(x(t),u(t))$ 减去调制所需的成本 $c(x(t),u(t))$。

（2）假定有一个贴现因素为 $\alpha=0.50324$ 的贴现过程，则目标函数为：

$$J=E\left\{\sum_{t=0}^{\infty}\alpha^t[v(x(t),u(t))-c(x(t),u(t))]\right\}$$

最佳策略的存在模型

Shapiro A P, Skaletskaya E I：在有限的生物群落开发中的最佳策略的存在．Ecological Modelling, 1982, 17

$X_n=\{x_n^{(1)},x_n^{(2)},\cdots,x_n^{(k)}\}$ 描述在第 n 个时刻一个特定的生物群落的状态，$x_n^{(i)}$ 生物群落中第 i 个种群的个体数量或生物量。在当前的第 n 个时刻的调控由以下向量决定：

$$U_n=\{u_n^{(1)},u_n^{(2)},\cdots,u_n^{(k)}\}$$

式中，$u_n^{(i)}\in[0,1]$。

因此，对一个无限的时间间隔的策略可用以下的向量序列来表示：

$$M=\{U_1,U_2,\cdots,U_n,\cdots\}$$

用 c_i 代表第 i 个种的单位生物量的价格，用 $\beta\in(0,1)$ 表示折扣系数，则最优性判别 ϕ 的值可根据下式决定：

$$\phi(M)=\sum_{n=0}^{\infty}\beta^n\left[\sum_{i=1}^{k}c_i x_n^{(i)}u_n^{(i)}\right]$$

式中，$x_{n+1}^{(i)}=f_i[(1-u_n^{(1)})x_n^{(1)},\cdots,(1-u_n^{(k)})x_n^{(k)}]$

定理：假设一个有控制策略 M 的离散系统，函数 f_i 在 $0\leqslant x_i\leqslant K\ (i=1,2,\cdots,k)$ 区间内是连续的，并且有一个上限值 K，则将有一个具有最大值 ϕ 的策略 M_0，它具有下面的结构：

$$M_0=\{U_0(X),U_0(X),\cdots,U_0(X),\cdots\}$$

从式中可以看出，它是固定不变的

开发指数(I_d)的计算公式

Racey G D, Euler D L：安大略湖中部开发别墅引起的[illegible]食物选择的变化 The Journal of Applied Ecology, 1983, 20

$$I_d=(Ag+As+At)/A_{REA}$$

式中，Ag 是底土层被扰乱的面积；As 是灌木层被扰乱的面积；At 是树木层被扰乱的面积；A_{REA} 是小区的陆地部分总面积。当本地区的所有植被完全被别墅的开发扰乱时，I_d 的值是 3.0。

植物物种组成和覆盖度动态模型

Bakker J P, Bie S D, Dallinga J H et al：绵羊放牧——荷兰欧石南丛生的荒野的保护和重建的一种管理工具 The Journal of Applied Ecology, 1983, 20

$$D_f(t_2-t_1)=\frac{d_f}{n_{t_1}+n_{t_2}}$$

$$D_c(t_2-t_1)=\frac{d_c}{c_{t_1}+c_{t_2}}$$

式中，$D_f(t_2-t_1)$ 是在状态 t_1 和 t_2 之间植物种类的差异；d_f 是指在比较 t_1 和 t_2 记录时，非共有物种的数量；n_{t_1} 是在时间 t_1 时物种总数；n_{t_2} 是在时间 t_2 时物种总数；$D_c(t_2-t_1)$ 是在状态 t_1 和 t_2 之间，植物覆盖度的差异；d_c 是指在 t_1 和 t_2 中物种覆盖度之间差值的绝对值的总和；c_{t_1} 是指在时间 t_1 所有物种的覆盖度的总和；c_{t_2} 是指在时间 t_2 所有物种的覆盖度的总和。

降雨不确定条件下碱性土改造的数学模型

Tyagi N K, Narayana V V D：降雨不确定条件下的碱性土改造计划 Ecological Modelling, 1983, 20

此数学模型由一个目标函数和一组系统约束因素组成。

目标函数为：

$$Z=\max\left(\sum_{j=1}^{m}P_jA_j+\sum_{i=1}^{n}P^{DT}DT_i-\sum_{i=1}^{n}C^{CW}CW_i-\sum_{i=1}^{n}C^{ST}ST_i\right)$$

式中，A_j是作物j的播种面积；P_j是作物j的收益；DT_i是在期间i输出的水量；P^{DT}是水输出的收益；CW_i是在i期间输出的管道水量；C^{CW}是管道水的售价；ST_i是抽取的浅层地下水量；C^{ST}是浅层地下水量的售价；i是一个时间周期指数($i=1,2,\cdots,n$)；j是作物活性系数($j=1,2,\cdots,m$)。

系统约束因素：

(1) 灌溉需水量：

要求在每一个决定性阶段的灌溉需水量至少达到$10B$，B是风险水平。这一偶然约束因素可表示为：

$$\Pr\left(\sum_{i=1}^{n}(C_{EC}CW_i+C_{ET}ST_i)-\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\frac{IR_{ij}A_{ij}}{AE_j}\right)\geqslant B_i^W$$

式中，Pr是概率算子，C_{EC}是管道系统的传输效率；C_{ET}是浅层管井系统的传输效率；A_{ij}是作物j在i期间的播种面积；IR_{ij}是作物j在i期间的灌溉需水量；AE_j作物j的田间用水效率；B^W_i是概率百分比。

(2) 当使用零次序的决策规则时，或然论约束因素变为：

$$C_{EC}CW_i+C_{ET}ST_i\geqslant T_{ij}^{-1}(B_i^W)$$

式中，$T_{ij}^{-1}(B_i^W)$的百分比分布可以由有效降雨量的分布函数来确定：

$$T_{ij}^{-1}(B_i^W)=\frac{CU_{ij}-F^{-1}(1-B_i^W)}{AE_j}$$

式中，CU_{ij}是作物j在i期间的蒸发蒸腾消耗。

(3) 灌溉系统容量：

$$CW_i\leqslant C_{CW}$$

$$\frac{R_{PS}\cdot ST_i}{C_{ET}}\leqslant C_{ST}$$

$$\frac{R_{PD}\cdot DT_i}{C_{ED}}\leqslant C_{DT}$$

式中，C_{CW}、C_{ST}和C_{DT}分别是管道、浅层管井和深层管井的设计容量；R_{PS}和R_{PD}分别代表浅层管井水和深层管井水的最大需求与平均需求的比率；C_{ED}是深层管井系统的传输效率。

(4) 土地面积约束因素：

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{\overline{m}}L_{ij}A_{ij}\leqslant NL$$

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=m+1}^{m}L_{ij}A_{ij}\leqslant AL$$

式中，L_{ij}是土地覆盖系数，如果土地被利用，$L_{ij}=1$，否则为0；AL是碱性土地面积。

(5) 地下水下降约束因素：

$$\sum_{i=1}^{n}(ST_i+DT_i+O_{GW_i}-E_{GW_i})-\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}E(C_{PRij})-\sum_{i=1}^{n}(C_{WRi}+S_{TRi}+C_{CRi}+I_{GWi})\leqslant M_{GW}$$

式中，I_{GW}是地下水从邻近区域的流入量；O_{GW}是地下水流向邻近区域的量；C_{WR}为从管道传输系统得到补充的量；S_{TR}是从管井传输系统得到补充的量；C_{CR}是从引水沟渠和排水沟中补充的水量；$E(C_{PR})$是从农田中得到补充水分的期望值；M_{GW}是采用地下水的补贴。

预测 SO_2 和火灾对西部松树森林的影响模型

Kercher J R, Axelrod M C：森林分析预测SO_2和火灾对西部松树森林影响的模型 Ecological Modelling, 1984, 23

(1) 指示变量的灵敏度（Γ）：

$$\Gamma=\frac{P_{pnew}-P_{pold}}{P_{pold}}\bigg/\frac{\mu_{pnew}-\mu_{pold}}{\mu_{old}}$$

式中，P_p是松树的基部面积密度；μ是模型的输入参数。

(2) 模型的收敛：

令$x(I,j,m)$为第m次运行中第j年的第i物种的基部面积，则在N次运行中第j年的第i物种的平均反应为：

$$\bar{x}(i,j)_N=\frac{1}{N}\sum_{m=1}^{N}x(i,j,m)$$

$$\bar{x}(i,j)_{N+1}=\frac{N}{N+1}\bar{x}(i,j)_N+\frac{1}{N+1}x(i,j,N-1)$$

定义数量：

$$\rho_{iN}=\frac{\sum_{j=1}^{L}[\bar{x}(i,j)_N-\bar{x}(i,j)_{N-1}^2]^{1/2}}{\left[\sum_{j=1}^{L}\bar{x}(i,j)_{N-1}^2\right]^{1/2}}$$

式中，L 是年数；ρ_{iN} 衡量在 N 次运行中第 i 物种的平均反应的收敛度。

高寒草甸灭鼠后鼠兔和鼢鼠数量恢复的数学模型

梁杰荣，周立，魏善武等：高寒草甸灭鼠后鼠兔和鼢鼠数量恢复的数学模型 生态学报，1984，4(1)

(1) 灭鼠后数量恢复时间模型：

$$t=t_r\ln\frac{\frac{1}{\tilde{N}_0}\frac{1}{m\%}-1}{\frac{1}{\tilde{N}_0}-1}$$

式中，t_r 为自然返回时间；$\tilde{N}_0$ 为灭杀前种群数量；$m\%$ 为残鼠占种群的百分比。

(2) 残鼠数量恢复的数学模型：

每年杀灭种群一定比例情况下的可恢复模型：

$$\begin{cases}\dfrac{dN_n}{dt}=rN_n\left(1-\dfrac{N_n}{K}\right)\\ N_n(n-1)=N_{n-1}(n-1)m\%\end{cases}$$

$$(\text{当}n=1,2,3,\cdots\text{年},\ n-1\leqslant t\leqslant n)$$

每年杀灭一定数量的可恢复模型：

$$\begin{cases}\dfrac{dN}{dt}=rN\left(1-\dfrac{N}{K}\right)-u\\ N(0)=N_0\end{cases}$$

式中，r 为内禀增长率；K 为环境容纳量；N 为种群数量，是时间的函数；t 为时间，以年计算；N_n 为种群在 $n-1\leqslant t\leqslant n$ 年时的数量；$m\%$ 为每年残留百分比；u 为每年灭杀的种群数量。

生物生产量模型

李飞：红松阔叶林及其次生杨桦林生物生产量的研究 生态学杂志，1984，2

(1) 地上各部分重量的曲线拟合模型：

$$\hat{y}_k=\hat{\beta}_1x_{k1}+\hat{\beta}_2x_{k2}+\hat{\beta}_3x_{k3}-\hat{\beta}_4x_{k4}$$

式中，$\hat{y}_k$ 为树木地上某一部分或地上部分的总重量；$\hat{\beta}_j$ 为待估计参数；x_{kl} 为树木的胸径的函数。

(2) 枝的生产率 P_W 模型：

$$P_W=\frac{D_A^2L_A-D_{A-5}^2L_{A-5}}{D_A^2L_A+D_{A-5}^2L_{A-5}}\cdot\frac{200}{5}$$

式中，D_A 和 L_A 分别为现在枝的基径和枝长；D_{A-5} 和 L_{A-5} 分别为五年前枝的基径和枝长。

人参生态气候适应性分区指数 $\bar{\mu}$

张其书，王淑：人参生态气候环境及其种植地域适应性的研究 植物生态学与地植物学丛刊，1984，8(2)

$$\bar{\mu}=\sum_{j=1}^{5}\mu_j(x)M_j$$

式中，$\mu_j(x)$ 为气候因素的隶属函数；M_j 为权重。

半沙漠山地的最优苗木密度-灾害模型

Loehle C：半沙漠山地的最优苗木密度-灾害理论模型 Ecological Modelling, 1985, 27

(1) 植物生长：

$$G=gV(1-V/V_{\max})$$

式中，生长季中的植物生长一般可以使用 Logistic 类型的函数模拟；G 是 Logistic 中任意时间的生长率；V 是当前的植被；g 是相对生长率；$V_{\max}$ 是生境最大的直立农作物数量，且 $V_{\max}=y(P_{PT}-z)$，y 是斜率，z 是零截留，P_{PT} 是降水量。

(2) 食草动物：

总消费量 C 如下：

$$C=\frac{c_{\max}H(V-V_{\min})}{(V-V_{\min})+K}$$

式中，$c_{\max}$ 是每天的个体最大消费率；K 是半饱和常数；$V_{\min}$ 是不可放牧的储量；H 是一个相等规模的食草动物种群。

(3) 系统平衡和灾难增多：

当 $G-C=0$ 时，生长和消费这两个过程达到平衡。展开、代入得：

$$f(V)=\frac{g_{max}}{V_{max}}\Big\{(-h)V^4+hV_{max}-(1-hV_{crit})+$$
$$(hV_{min}-hK)V^3+[(1-hV_{crit})V_{max}-$$
$$hV_{min}V_{max}+hKV_{max}+(1-hV_{crit})V_{min}-$$
$$(1-hV_{crit})K]V^2+$$
$$[-(1-hV_{crit})V_{min}V_{max}+(1-hV_{crit})KV_{max}]-$$
$$\frac{[c_{max}HV_{max}]V}{g_{max}}+\frac{c_{max}HV_{min}V_{max}}{g_{max}}\Big\}=0$$

式中，h 是 g 随 V 的下降速率；V_{crit} 是发生能够察觉的生长抑制的水平。

令：

$$h=0$$
$$c_1=-V_{max}-V_{min}+K$$
$$c_2=V_{min}V_{max}-KV_{max}+\frac{c_{max}HV_{max}}{g_{max}}$$
$$c_3=\frac{-c_{max}HV_{min}V_{max}}{g_{max}}$$

则 $f(V)$ 可以表示为：

$$V^3+c_1V^2+c_2V+c_3=0$$

这是一个外部灾害方程。

贴近度模型

杨风祥：试论贴近度与择近原则在放牧衰退演替系列中更替种群的识别应用．生态学杂志，1985，4

$$\left(\underset{\sim}{A},\underset{\sim}{B}\right)\triangleq\frac{\sum_{k=1}^{n}\min\left[\mu_A(\mu_k),\ \mu_B(\mu_k)\right]}{\sum_{k=1}^{n}\max\left[\mu_A(\mu_k),\ \mu_B(\mu_k)\right]}$$

式中，μ_k 为集合 $\underset{\sim}{A}$ 的元素。

叶绿素含量模型

刘吉录，陈楚莹：杉木人工林叶绿素含量的研究．生态学杂志，1985，4

$$C=(20.2D_{645}+8.02D_{663})\frac{V}{1000W}$$

式中，C 为叶绿素总量；D 为在特定的波长下，叶绿素提取液的光密度读数；V 为 D_{MSO} 叶绿素提取液的最终体积；W 为提取用的样品克数。

William-Clifford 相异性指标

王震宙，胡秉民：从晚稻育种区的划分看互作系数和相关系数的效益．生态学杂志，1985，5

$$W(T_1,T_2)=\frac{\sum_{j=1}^{N-1}\sum_{k=j+1}^{N}\left|t_{jk}^{(1)}-t_{jk}^{(2)}\right|}{\sum_{j=1}^{N-1}\sum_{k=j+1}^{N}t_{jk}^{(1)}+\sum_{j=1}^{N-1}\sum_{k=j+1}^{N}t_{jk}^{(2)}}$$

式中，T_1 与 T_2 为不同聚类的节点等高矩阵；$t^{(1)}_{jk}$ 为 T_1 聚类相应的指标序列；$t^{(2)}_{jk}$ 为 T_2 聚类相应的指标序列；$W(T_1, T_2)$ 为两个聚类的相并指标。

自然保护理论模型

牛文元：设计自然保护区的理论基础．生态学杂志，1985，5

(1) 物种与面积之间的关系模型：

$$S=CA^Z$$

或

$$\lg S=\lg C+Z\lg A$$

式中，S 为生物物种的数目；A 为所研究的面积大小；C 为物种分布的密度，即单位面积内的物种数量；Z 为一复杂函数。

(2) 评价一个自然保护区的动态特征的模型：

$$Q=\frac{\partial I}{\partial t}\begin{cases}>0 & \text{（物种增加）}\\ =0 & \text{（物种稳定）}\\ <0 & \text{（物种减少）}\end{cases}$$

式中，I_i 为迁移指标；针对不同的判别值 Q，可以对自然保护区做出相应的决策。

森林砍伐后植物再生长的马尔可夫模型

Kachi N, Yasuoka Y, Totsuka T et al：描述森林砍伐后植物再生长的随机性模型——遥感的应用．Ecological Modelling, 1986, 32

(1) 在 t 年份，三个物种的相对丰富度可表达为：

$$C_t=[c_{1t},c_{2t},c_{3t}]$$

式中，c_{it} 是物种 i 的相对丰富度。

$$\sum_i c_{it}=1.0$$

$$C_{t+1}=C_tP_{t,t+1}$$

(2) 物种相对丰富度的瞬时行为可以用一个稳定态马尔可夫模型描述，即：

$$C_{t+x}=C_t(P_{t,t+1})^x$$

式中，$P_{t,t+1}$ 是转移概率矩阵,假定它不随时间而改变。

一块喀斯特草原样本的灭绝时间模型

Favretto D, Poldini L：由于灌丛侵蚀，一块喀斯特草原样本的灭绝时间　Ecological Modelling, 1986, 33

由于灌丛侵蚀率较高，自然草场的累进减少量可表达为：

$$\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}=aB-a\frac{B^2}{P_0}$$

$$B(t)=\frac{1}{\frac{1}{P_0}+e^{-a(t-\tau)}\left[\frac{1}{B(\tau)}-\frac{1}{P_0}\right]}$$

影响条件：

$$B(t)+P(t)=P_0$$

式中，t,τ 是时间(a)；$B(t)$是在 t 年份草场的灌丛侵蚀；$P(t)$是年份 t 的自然草场面积；P_0是总可用面积；a 是模型参数。

单株植物水分营养面积与蒸发量模型

蒋瑾，从自立：从水分平衡角度探讨固沙植物的合理密度问题　生态学杂志，1986，5(1)

(1) 蒸发量 E 模型的计算方法：

1) 水分平衡法：

$$E=r+(w_1-w_2)-f$$

式中，r 为降水量；w_1, w_2 分别为初期和结束时的储水量；f 为排水量。

2) 伊万诺夫法：

$$E=E_t+E_v$$

式中，E_t为植物蒸腾量；E_v为土壤蒸发量。

3) 扩散法：

$$E=K\Delta e$$

式中，Δe 为在两个高度上的绝对湿度值之差，用湿度计读数测定；$K=\frac{0.14\Delta u}{\ln\frac{z_2}{z_1}}\left[1+\left(\ln\frac{z_2}{z_1}\right)\frac{\Delta t}{\Delta u^2}\right]$，为乱流系数，$z_1$, z_2分别为湿度计和风速计装置的高度，Δt 为相应两个高度的温度差；Δu 为两个高度的风速差。

(2) 单株植物水分营养面积 S 模型：

$$S=\frac{Tk\cdot M}{r-E_v}$$

式中，Tk 为蒸腾系数，且 $Tk=\frac{E_t}{M}$；r 为生长期有效降水量；M 为生物量；E_v 为生长期土壤蒸发量。

常绿阔叶林分类的相似性系数 r_{ij}

杨远侠，何绍珩，陈北光：模糊聚类分析在常绿阔叶林类型划分上的应用　生态学杂志，1987，6(1)

$$r_{ij}=\begin{cases}1 & (i=j)\\ \dfrac{\sum_{k=1}^{m}\min(x_{ik},x_{jk})}{\sum_{k=1}^{m}\max(x_{ik},x_{jk})} & (i\neq j)\end{cases}$$

式中，r_{ij} 为林型 i 与林型 j 的相似系数，表示隶属函数，$0\leqslant r_{ij}\leqslant 1$；$m$ 为分类因子个数。

种间相遇几率 P_{IE}

北京次生林研究协作组：密云古石峪封山育林实验方法　植物生态学与地植物学学报，1987，11(2)

$$P_{IE}=\sum_{i=1}^{s}\frac{n_i}{N}\frac{N-n_i}{N-1}$$

式中，S 为种的数目；n_i 为第 i 个种的数目；N 为所有种的个体总数。

土壤储水量 ΔM

焦树仁：辽宁章古台樟子松人工林水分动态的研究　植物生态学与地植物学学报，1987，11(4)

$$\Delta M=(T_f+Q_f)-\left[(Q_1+Q_2)+\pi+(E_1+E_2)+S+\Delta W_1\right]$$

式中，T_f 为透过林冠的降水量；Q_f 为树干径流；Q_1、Q_2 分别为地表和地中径流；π 为深层入渗量；E_1, E_2 分别为地表物理蒸发和植物蒸腾；S 为乔木根吸水量；ΔW_1 为订正值。

种群密度 D 和休耕期 P 的关系

Wilkie D S, Finn J T：扎伊尔东北部 Ituri 森林的土地利用和森林再生的空间模型　Ecological Modelling, 1988, 41

$$A=\frac{D}{C+P}$$

式中，A 是每年一个家庭清除的面积；C 是累积的年数。

一致性检验模型

周玉丽：层次分析法在制定农业生态经济发展规划中的应用　生态学杂志，1988，7(2)

(1) 一致性指标 C.I 模型：

单层次排序：

$$C.I = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1}$$

多层次排序：

$$C.I = \sum_{i=1}^{m} a_i (C.I)_i$$

式中，$(C.I)_i$ 为 a_i 对应的单层次排序指标。

(2) 随机一致性比值 C.R.模型：

单层次排序：

$$C.R. = \frac{C.I}{R.I}$$

多层次排序：

$$C.R. = \sum_{i=1}^{m} a_i (C.I)_i \Big/ \sum_{i=1}^{m} a_i (R.I)_i$$

式中，$(R.I)_i$ 为 a_i 对应的单层次排序指标；R.I 为一个系数。

气候及气候生态因子相关分析

张嵩午：汉中盆地水稻区气候生态条件的综合评判和分型问题．生态学杂志，1988，7(4)

$$R = \frac{P(x=1, y=1) - P(x=1)\,P(y=1)}{\sqrt{P(x=1)\,\overline{P}(x=1)\,P(y=1)\,\overline{P}(y=1)}}$$

式中，$P(x=1)$ 为因子出现"1"时的气候概率；$P(y=1)$ 为对象出现"1"时的气候概率；x 为气候生态因子；y 为对象；$P(x=0) = \overline{P}(x=1)$；$P(y=0) = \overline{P}(y=1)$。

森林资源退化和再生的数学模型

Shukla J B，Freedman H I，Pal V N et al：森林资源的退化和再生——一个数学模型．Ecological Modelling，1989，44

(1) 森林退化模型：

考虑在一个简单的封闭区域中森林生长的容量

$$\frac{\partial B}{\partial t} = rB\left(1 - \frac{B}{K}\right) - \alpha BI + D\nabla^2 B$$

$$\frac{\partial I}{\partial t} = sI\left(1 - \frac{I}{L}\right) + \delta\,\nabla^2 I$$

式中，$\nabla^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ 是 Laplace 扩散算子；$B(x, y, t)$，$I(x, y, t)$ 分别是在坐标 (x, y) 处和时间 t 时的森林生物量和工业化压力；r 和 s 分别是森林生物量和工业化压力的物种增长率；K 和 L 分别是它们的承载力；D 和 δ 分别是它们的扩散系数；α 是森林生物量退化系数。

(2) 退化和森林再生的组合模型：

$$\frac{\partial B}{\partial t} = rB\left(1 - \frac{B}{K}\right) - \alpha BI + \beta R + D\nabla^2 B$$

$$\frac{\partial I}{\partial t} = sI\left(1 - \frac{I}{L}\right) + \delta\nabla^2 I$$

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \gamma\left(1 - \frac{B}{K}\right)$$

式中，R 是森林再生效果。

固沙林引起下垫面热量平衡特征变化的分析模型

邢兆凯：章古台固沙林引起下垫面热量平衡特征变化的分析．生态学杂志，1989，8(1)

(1) 有效辐射的变化 I 模型：

$$I = I_0(1 - cn^2) + 4s\sigma\theta^3(\theta u - \theta)$$

$$I_0 = s\sigma\theta^4(0.39 - 0.058\sqrt{e})$$

式中，I_0 为碧空条件下的有效辐射；s 为灰体辐射系数；$\sigma = 8.14 \times 10^{-11}$ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数；θ,e 分别为下垫面 2.0m 高绝对温度和水汽压；c=0.69 为云的订正系数；n 为云量；θu 为下垫面温度。

(2) 显热通量的变化 P 模型：

$$P = \frac{(B - A)\Delta T}{\Delta T + 1.56\Delta e}$$

式中，ΔT，Δe 分别为距作用面 0.5m 和 2.0m 两个高度的温度差和湿度差。

(3) 土壤储热量的变化 A 模型：

$$A = \sum_{i=1}^{4} A_i$$

$$A_i = \frac{\Delta T_i}{\Delta t} uH$$

式中，A_i 为 0~5,5~10,10~15,15~20cm 深土层第 i 层土柱储热量的变化；$\frac{\Delta T_i}{\Delta t}$ 为第 i 层土柱温度的平均变率；u 为土壤容积热容量；H 为土柱高度。

(4) 潜热通量的变化 β 模型：

$$\beta = 6.1 \times 10^{-4} P \frac{T_2 - T_1}{e_2 - e_1}$$

式中，P 为气压；T_1, T_2 和 e_1, e_2 分别为两个高度的气

温和水汽压。

相似系数(隶属度)r_{ij}

郑可锋：浙江省德清县农业生态经济分区。生态学杂志，1989，8(1)

(1) 交角余弦法：

$$r_{ij}=\frac{\sum_{k=1}^{m}x_{ik}\,x_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{m}x_{ik}^{2}\sum_{k=1}^{m}x_{jk}^{2}}}$$

$$(i,j=1,2,\cdots,n;\ k=1,2,\cdots,m)$$

式中，n 为分区单位个数；m 为分区因素数；x_{ik} 为第 i 分区单位的第 k 个分区因素的值；x_{jk} 为第 j 分区单位第 k 个分区因素的数值。

(2) 绝对值差数法：

$$r_{ij}=\begin{cases}1 & (i=j)\\ 1-c\sum_{k=1}^{m}\left|x_{ik}-x_{jk}\right| & (i\neq j)\end{cases}$$

式中，c 为一个适当的正数，使 $r_{ij}\in[0,1]$。

(3) 相关系数法：

$$r_{ij}=\frac{\sum_{k=1}^{m}(x_{ik}-\bar{x}_i)(x_{jk}-\bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^{m}(x_{ik}-\bar{x}_i)^2\sum_{k=1}^{m}(x_{jk}-\bar{x}_j)^2}}$$

$$\bar{x}_i=\frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m}x_{ik}$$

$$\bar{x}_j=\frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m}x_{jk}$$

邻体竞争效应及邻体干扰指数

张大勇，赵松岭，张鹏云等：青杆林恢复演替过程中的邻体竞争效应及邻体干扰指数的改进模型。生态学报，1989，9(1)

(1) 邻体竞争效应——Weiner 的邻体干扰模型：

$$I=\sum_{i=1}^{N}S_i d_i^{-2}$$

式中，d_i 为基株到第 i 邻体的距离；N 为邻体的数目；S_i 为第 i 邻体的大小。

(2) 改进的邻体干扰指数模型：

$$I=\sum_{i=1}^{N}\frac{S_i}{S}\,\frac{1}{d_i}$$

式中，S 为基株的大小；其他参数同前。

相异性分析和模糊判别模型

郭有、彭蔚彬、孙玉芳等：辽宁省农村生态经济分区的研究。生态学杂志，1989，8(2)

(1) 相异性分析模型：

1) 欧氏距离平方模型：

$$D(I,J)=\sum_{K=1}^{N}\left[C(I,K)-C(J,K)\right]^2$$

$$(I=1,2,\cdots,M;\ J=I+1,\cdots,M)$$

2) 相异性指标模型：

$$f(C,Q)=\frac{1}{n_Q}\sum D_{xK}^2$$

(2) 模糊判别检验：

1) 区内指标特征值模型：

$$S=\sqrt{\sum_{i=1}^{H}\left(X_{Li}-\bar{X}_L\right)^2\Big/(n-1)}$$

式中，L 为区号；H 为区内含样本数。

2) Ⅰ与Ⅱ区的判别系数模型：

$$A=\frac{\sum_{K=1}^{m}W^{(K)}C_{\mathrm{I}}^{(K)}C_{\mathrm{II}}^{(K)}}{\sqrt{\sum_{K=1}^{m}\left[C_{\mathrm{I}}^{(K)}\right]^2\sum_{K=1}^{m}\left[C_{\mathrm{II}}^{(K)}\right]^2}}$$

式中，$W^{(K)}$ 为Ⅰ与Ⅱ区之间第 K 个指标的权重值。

森林动态模型

邵国凡：当代森林动态的计算机模型述评。生态学杂志，1989，8(2)

(1) 树木更替模型：

$$\frac{\mathrm{d}Y_i}{\mathrm{d}t}=\frac{(P_{ii}-1)Y_i}{L_i}+\sum_{j\neq i}^{n}\frac{P_{ij}Y_j}{L_j}$$

$$(i=1,2,\cdots,n)$$

$$(j=1,2,\cdots,n)$$

式中，$Y_{i或j}$ 为树种 i 或 j 在林冠层的组成；P_{ij} 为树种 i 取代树种 j 的概率；$L_{i或j}$ 为树种 i 或 j 的生命周期；n

为树种数量。

(2) 森林矩阵模型：

$$\begin{pmatrix} y_{1,t+k} \\ y_{2,t+k} \\ y_{3,t+k} \\ y_{4,t+k} \\ \vdots \\ y_{n,t+k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{1t} & d_{2t} & d_{3t} & d_{4t} & \cdots & d_{nt} \\ b_{1t} & a_{2t} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ c_{1t} & b_{2t} & a_{3t} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & c_{2t} & b_{3t} & a_{4t} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{nt} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_{1t}-h_{1t} \\ y_{2t}-h_{2t} \\ y_{3t}-h_{3t} \\ y_{4t}-h_{4t} \\ \vdots \\ y_{nt}-h_{nt} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

(3) 与间距有关的单木模型：

$$CI_i = \sum_{j=1}^{m}\left(D_j/D_i\right)/D_{\mathrm{IST}ij}$$

式中，CI_i 为对象木 i 的简单竞争指数；D 为胸径；$D_{\mathrm{IST}ij}$ 为对象木 i 与竞争木 j 的距离；N 为竞争木的株数。

经济生态发展模式

周纪纶，周伟：利用"复杂性"解说经济生态发展模式．生态学杂志，1989，8(4)

(1) 农业增长速率 $\frac{dx_1}{dt}$ 模型：

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{k_{11}x_1 f(x_2)}{x_1 + k_{12}} - \frac{k_{13}x_3}{k_{14} + x_3}$$

(2) 工业增长速率 $\frac{dx_2}{dt}$ 模型：

$$\frac{dx_2}{dt} = k_{21}x_2 - \frac{k_{22}x_3}{k_{23} + x_3}$$

(3) 环境质量的负增长速率 $\frac{dx_3}{dt}$ 模型：

$$\frac{dx_3}{dt} = -\frac{\beta k_{31}x_1}{k_{35}x_1 + 1} + \frac{k_{32}x_2}{k_{33} + x_2} - k_{34}x_3$$

式中，x_1 为农业产值；x_2 为工业产值；x_3 为环境质量指标项的负荷平均值；k_{11} 为农业自身增长率；k_{12} 为农业增长率为阈值的一半时的农业产值；k_{13} 为农业因污染而招致减产系数；k_{14} 为污染对农业生产影响达到阈值一半时的环境质量指标；k_{21} 为工业自身增长率；k_{22} 为工业因污染而招致减产系数；k_{23} 为污染对工业生产影响达到阈值一半时的环境质量指标；βk_{31} 为农业对污染的分解作用；k_{12} 为农业对污染降解作用达到阈值的一半时的农业产值；k_{32} 为工业对环境污染的影响；k_{33} 为工业对环境影响达到阈值一半时的工业产值；k_{34} 为环境污染的自然降解系数。

湿地松人工林生物量模型

汪企明，石有光：江苏省湿地松人工林生物量的初步研究．植物生态学与地植物学学报，1990，14(1)

(1) 净生产量 ΔW 模型：

$$\Delta W = \frac{W_a - W_{a-n}}{n}$$

式中，W_a 为单位面积现存量；W_{a-n} 为 n 年前单位面积的生物量；n 为从 W_{a-n} 到 W_a 的年数。

(2) 净同化率 ΔP 模型：

$$\Delta P = \frac{\Delta W}{I_{\mathrm{na}}}$$

式中，ΔP 为单位面积的净生产力，反映其光合同化效率的高低；I_{na} 为叶面积指数。

(3) 生物量模型：

$$\lg W = B + A\lg(D^2H)$$

式中，W 为某器官或总生物量；D 为胸径；H 为树高；A、B 为常数。

草场中羊草枯枝落叶形成过程模型

郭继勋：松嫩平原羊草草场中羊草枯枝落叶形成过程的初步研究．生态学杂志，1990，9(1)

(1) 枯死速率 V 模型：

$$V = \frac{\left(D_{i+1} - D_i e^{-rt}\right)r}{1 - e^{-rt}}$$

式中，D_{i+1}、D_i 分别为时间 t_{i+1} 和 t_i 时的枯枝落叶量；r 为枯死体的消失率。

(2) 枯死量 ΔD 模型：

$$\Delta D = Vt$$

光强度 I

谢进：控制常绿针叶树叶量对树干生长的促进作用．生态学杂志，1990，9(1)

$$I = I_0 e^{-kF}$$

式中，I_0 为林冠上的光强度；F 为林冠叶面积；k 为消光系数。

渔业生态经济系统动态模型

叶益民：渔业资源开发的生态经济系统分析．生态学杂志，1990，9(1)

$$\begin{cases}\frac{dX_t}{dt}=rX_t\left(1-\frac{X_t}{k}\right)-qE_tX_t\\ \frac{dE_t}{dt}=(qE_tpX_t-cE_t)\eta\end{cases}$$

式中，X_t为t时刻种群资源量；r为内禀增长率；k为环境容纳量；t为时间；E_t为捕捞努力量；q为捕捞系数；p为鱼价；c为单位努力量的机会成本；η为系数，表示利润在E的变化上所反映的强弱程度。

草场质量指数 I_{gq}

张大勇，王刚，杜国祯：甘南山地草原人工林草场的演替 植物生态学与地植物学学报，1990，14(2)

$$I_{gq}=\sum_{i=-1}^{3}iS_i$$

式中，S_{-1}为毒草类的大小；S_0, S_1, S_2和S_3分别为适口性劣、低、中和优良植物类的大小。

油松人工林生物量和生产力模型

肖瑜：陕西省不同气候区域油松人工林生物量和生产力的比较研究 植物生态学与地植物学学报，1990，14(3)

(1) 乔木层的净初级生产量 P_{np}模型：

$$P_{np}=Y_{NS}+Y_{NB}+Y_{NL}+Y_{NR}$$

式中，Y_{NS}, Y_{NB}, Y_{NL}和Y_{NR}分别为林木树干(带皮)、树枝、树叶和树根的年生长量。

(2) 油松单束针叶的面积S模型：

$$S=1.5\pi\cdot\frac{A}{2}\cdot L+\frac{2V}{A}\left(\frac{4}{\pi}+1.5\right)-\sqrt{\pi VL}$$

式中，S为单束针叶叶面积；L为针叶长度；A为针叶横截面积长轴长度；V为针叶体积。

旱地作物生态工程的设计模型

杜心田，张来应：旱地作物生态工程的设计 生态学杂志，1990，9(3)

(1) 作物布局——自给性粮食的种类和面积A_g模型：

$$A_g=\frac{G_r+G_f+G_o}{y_g}$$

式中，G_r为当地人民的口粮；G_f为饲料粮；G_o为其他用粮；y_g为粮食作物的平均产量。

(2) 农田规划——梯田规划模型：

$$H_t=W_e\sin\alpha$$
$$W_f=H_t(\cot\alpha-\cot\theta)$$
$$W_b=H_b\cot\alpha$$

式中，H_t为田坎高度；W_f为田面宽度；W_e为原地面宽度；H_b, W_b分别为田埂高度和底宽；α为原地面坡度；θ为田坎坡度。

(3) 作物结构——幅宽B和带宽W模型：

$$B=\overline{R}(N-1)$$
$$W=\sum_{i=1}^{n}(B_i+I_i)$$

式中，N为行数；I为间距。

(4) 肥料规划的肥料结构模型：

$$f=\frac{r-p}{cu}$$

式中，r为单位面积某种营养元素的需要量；p为土壤供给量；c为某肥料含该元素的数量；u为肥料利用率。

樟子松固沙林动力效应模型

郗兆凯，刘亚平：樟子松固沙林动力效应的研究 生态学杂志，1990，9(6)

(1) 风速模型：

$$u=(u_*/k)\ln[(Z-D)/Z_0]$$

式中，u为Z高度风速；u_*为摩擦风速；k=0.4为卡曼常数；Z_0为粗糙度；D为零平面位移。

(2) 湍流交换系数k_a模型：

$$k_a=\frac{k\Delta u}{\ln\frac{Z_2}{Z_1}}\left(1-\frac{gh}{Q}\cdot\frac{\Delta Q}{\Delta u^2}\ln\frac{Z_2}{Z_1}\right)Z$$

式中，Δu为Z_1,Z_2为两个高度上的风速差；g为重力加速度；h为海拔高度；Q为位温；ΔQ为两个高度上的位温差；Z为距作用面高度。

(3) 空气动力阻抗r_a模型：

$$r_a=\left(1-\frac{3n}{4}\right)\left(\ln\frac{Z-D}{Z_0}\right)^2\Big/k^2u$$

式中，Z为观测高度。

FORSKA 模型

Leemans R：森林演替模型的灵敏度分析 Ecological Modelling, 1991, 53

(1) 小树成材概率：

$$P(n)=E'^n\frac{\exp(-E')}{n!}$$

(2) 小树的初始叶面积：

$$L_1=CD^2$$

(3) D_{BH} 和高度函数：

$$H=1.3+(H_{max}-1.3)\{1-\exp[-sD/(H_{max}-1.3)]\}$$

(4) 与 D_{BH} 和高度相关的生物量：

$$W=bD^2H$$

(5) 树冠的光拦截率：

$$I_z=I_0\exp(-kF_z)$$

(6) 物种的光反应曲线：

$$P_z=\frac{kI_z-c}{kI_z+\alpha-c}$$

(7) 生长方程：

$$\frac{d}{dt}(D^2H)=\left(1-\frac{W_{tot}}{W_{max}}\right)\int_B^H S_L(\gamma P_z-\delta z)dz$$

(8) 叶面积函数：

$$\frac{dL}{dt}=C\frac{d}{dt}D^2-tL$$

(9) 死亡率：

$$X=U_0+\frac{U_1}{1+\left(\frac{E_{rel}}{\theta}\right)^{\rho}}$$

(10) 死亡概率：

$$P_d=1-\exp(-X_t)$$

模型的树木状态变量：

D 是胸高直径；H 是树木高度；B 是树干高度；L 是叶面积；L_1 是初始叶面积；S_L 是叶面积的垂直密度；P_z 是在树冠深度 z 处净同化作用的换算系数；W 是干重；E_{rel} 是活力指数；X 是死亡率；P_d 是死亡概率。

模型的状态参数：

I_0 是生长季节平均光照强度；I_z 是在树冠深度 z 处的有效光照；k 是消光系数；F_z 是在树冠深度 z 上部的总叶面积；b 是树干生物量转换因子；W_{tot} 是总缀块生物量；W_{max} 是特定生境的最大生物量；ρ 是死亡率曲线的陡度参数；t 是时间段的长度。

模型的物种参数：

E' 是小树成材率；n 是成材小树的数量；C 是初始叶面积与 D^2 的比率；H_{max} 是最大树木高度；s 是直径与高度的初始斜率；c 是光补偿点；α 是半饱和点；γ 是生长比例因子；δ 是边材维护成本因子；t 是边材周转率；U_0 是固有死亡率；U_1 是抑制导致的死亡率；θ 是活力指数的边界值。

海藻生长和最优采集模型

Lee C S, Jr P A：海藻生长和最优采集策略的简化模型，Ecological Modelling, 1991, 55

(1) 海藻生长模型：

$$\dot{N}=\left[\left(1-\frac{N}{K}\right)r-d\right]N-u$$

式中，$N(t)$ 表示在时间 t 一个群落中某种海藻的生物量；K 是群落中这一物种的承载力；$r(t)$ 和 $d(t)$ 分别表示随物种生长率和死亡率变化的时间，$r(t)$ 和 $d(t)$ 都是时间的周期函数；$u(t)$ 表示在时间 t 的采集率；$r=a_1+\frac{a_2}{2}[1-\cos(2t\pi)]$；$d=b_1-b_2\sin(2t\pi)$，$a_1, a_2, b_1$ 和 b_2 是正参数。

(2) 海藻生物量的最佳水平 $N^*(t)$：

$$N^*=\frac{K}{2}\left(1-\frac{d}{r}\right)$$

(3) 最佳定期采集策略 $u^*(t)$：

$$u^*=\frac{K}{r}\left(\frac{r-d}{2}\right)^2+\frac{K}{2}\left(\frac{r\dot{d}-d\dot{r}}{r^2}\right)$$

森林资源采伐效益的综合评价模型

倪祖彬：森林采伐更新效益综合评价的几个基本问题，自然资源学报，1991，6(2)

(1) 每年最大的采伐蓄积量：

$$Y=S_{max}\frac{Y_{(T)}}{T}$$

式中，Y 为年最大采伐蓄积量；S 为经营范围内用材林总面积；$Y_{(T)}$ 为单位用材林地面积蓄积生长函数；T 为轮伐周期(a)。

假设木材价格 P 与采伐成本 C 均为常数，年利率为 r，则单位面积木材 T 年后采伐的期望现值(V)为

$(P-C)e^{-rT}Y_{(T)}$，对此求一个轮伐周期的极大值，就是使：

$$V'=\left[Y'_{(T)}e^{-rT}-rY_{(T)}e^{-rT}\right](P-C)=0$$

即：

$$Y'_{(T)}-rY_{(T)}=0$$

由于 $r>0$，$Y_{(T)}\geqslant 0$，所以只有当 $Y'_{(T)}>rY_{(T)}\geqslant 0$ 时，才不至于使 $V'<0$。可见，直到 V 达极大值时，都有 $Y'_{(T)}\geqslant 0$，根据导数性质，就有 $\max T_V<\max T_Y$，其中 T_V 与 T_Y 分别为期望现值 V 和生长量 Y 达到最大值时的采伐年龄。

(2) 林业企业采伐更新直接经济效益的数学公式为：

$$E=\frac{S\sum}{L\sum}=ZD \qquad (最大)$$

式中，E 为企业直接经济效益；S 为企业采伐更新的原木或产值或税利等使用价值量或价值量；L 为企业采伐更新的活劳动消耗量与物化劳动消耗量之和；$\sum$ 为注脚符号，代表轮伐周期 N_i 年内的总和。

(3) 单位面积林木生长的期望现值：

可将公式 $Y'_{(T)}-rY_{(T)}=0$ 中的材积生长函数扩充为时间 T、育林投入 I(用货币表现)与林地等级 F 三者的函数。

单位面积林木生长的期望现值即为：

$$V=(P-C)Y(T\ I\ F)e^{-rT}-I$$

由上式可以看出，即使 Y 值不变，V 值仍可发生变化。由于森林质量下降，欲保持 Y 的正常产出，势必要追加育林投入。设正常的育林投入为 I，补偿林地生态环境损失而追加的投入为 $\Delta I(I_{T_1}-I_{T_2})$；林地生态效益的降低值。当 ΔI 过大或 I 足够大时，以至可能出现：$V=(P-C)Y(T\ I\ F)e^{-rT}-I\leqslant 0$。

假设，常态下用 N_i 表示单位森林面积对生态与社会 i 各方面影响所产生的效益，B_i 和 D_i 分别代表相应的增益和损失，那么，单位森林的总的生态效益可为：$\sum N_i=\sum B_i-\sum D_i$，运用此公式的增量形式，就可以求出采伐前后($T_0$-$T_1$)所引起的生态与社会效益的变化情况，即：

$$\sum \Delta N_i=R\left(\sum \Delta B_i-\sum \Delta D_i\right)$$

式中，R 为采伐影响生态与社会效益的权数，其取值范围为 0~1。

马尾松生长及虫害损失模拟模型

陈晓峰，李典谟：马尾松毛虫的为害损失级管理效益的模拟研究. 生态学报，1991，11(3)

(1) 马尾松生长模型：

$$W=a\ A^b$$

式中，W 为木材量；A 为年龄；a, b 为参数。

(2) 木材年单位生长率模型：

$$G=\left(1+\frac{1}{A}\right)^b-1-D_G$$

式中，D_G 为虫害对 G 的影响。

(3) 材积量的生长过程模型：

$$W(A+1)=W(A)\left[1+G(A)\right]$$

(4) 受虫害时，材积量的损失模型：

$$\mathrm{DW}(N)=D_G(A_0)W(A_0)\prod_{A=A_0+1}^{N-1}\left[G(A)+1\right]$$

或

$$\mathrm{DW}(N)=W_0(N)D_G(A_0)\Big/\left(1+\frac{1}{A_0}\right)^b$$

式中，A_0 为受害时松树年龄；N 为收获年龄；$W_0(N)$ 为无虫害影响、在收获年龄 N 时的材积量。

植物生产量预测模型

岳天祥：限制因子原理在植物生产量预测中的应用. 生态学杂志，1991，10(4)

(1) 植物生产系统的序参量：

$$X_1(S:\ t,p,R)=1$$

$$X_2(T:\ t,p,R)=\exp\left\{-A_2(t,p,R)\left[1-\frac{T_0(t,p,R)}{T(t,R)}\right]^2\right\}$$

$$X_3(F:\ t,p,R)=\exp\left\{-A_3(t,p,R)\left[1-\frac{F_0(t,p,R)}{F(t,p,R)}\right]^2\right\}$$

$$X_4(T:\ t,p,R)=\exp\left\{-A_4(t,p,R)\left[1-\frac{W_0(t,p,R)}{W(t,p,R)}\right]^2\right\}$$

$$X_5(I:\ t,p,R)=I(t,p,R)$$

式中，$T_0(t,p,R)$、$F_0(t,p,R)$和 $W_0(t,p,R)$分别为与植物种类 p、地域 R 和时间 t 有关的最佳温度、最佳施肥量和最佳水量；S, $T(t,R)$,$F(t,p,R)$,$W(t,p,R)$和 $I(t,p,R)$ 分别为实际太阳辐射、温度、施肥量、水量和投入水平；$A_i(t,p,R)$为和基质有关的待定常数。

(2) 植物产量 $C(t,p,R)$动态模型：

$$C(t,p,R)=f\left(X_1(t,p,R),\cdots,X_k(t,p,R),D_2(t,p,R)\right)$$

式中，D_2为分维数。

生态农业综合效益评价模型

朱孔来，马成霞：生态农业综合效益评价方法的研究。生态学杂志，1991，10(6)

(1) 指标的隶属函数$\underset{\sim}{B}_{(ei)}$模型：

1) 极大型：

$$\underset{\sim}{B}_{(ei)}=\begin{cases}1 & (e_i \geqslant M_i)\\ \dfrac{e_i-m_i}{M_i-m_i} & (m_i<e_i<M_i)\\ 0 & (e_i\leqslant m_i)\end{cases}$$

$$(i=1, 2, \cdots, G)$$

2) 极小型：

$$\underset{\sim}{B}_{(ei)}=\begin{cases}0 & (e_i \geqslant M_i)\\ \dfrac{M_i-e_i}{M_i-m_i} & (m_i<e_i<M_i)\\ 1 & (e_i\leqslant m_i)\end{cases}$$

$$(i=G+1, G+2, \cdots, H)$$

3) 适中型：

$$\underset{\sim}{B}_{(ei)}=\begin{cases}\dfrac{2(e_i-m_i)}{M_i-m_i} & \left(m_i\leqslant e_i<\dfrac{M_i-m_i}{2}\right)\\ \dfrac{2(M_i-e_i)}{M_i-m_i} & \left(\dfrac{M_i-m_i}{2}\leqslant e_i\leqslant M_i\right)\\ 0 & (e_i<m_i, e_i>M_i)\end{cases}$$

$$(i=H+1, H+2, \cdots, n)$$

(2) 线性加权和函数模型：

$$U_j(x)=\sum_{i=1}^{n} b_{ij}\underset{\sim}{B}_{ij}$$

$$(i=1, 2, \cdots, n;\quad j=1, 2, \cdots, m)$$

式中，$U_j(x)$为第j系统或模式的线性加权和函数；b_{ij}为第j系统或模式第i个指标的权重值；$\underset{\sim}{B}_{ij}$为第j系统或模式第i个指标的隶属度值。

物种数量-丰富度关系的对数正态分布

Wissel C：生态模拟的目标和限制——以孤岛理论为例。Ecological Modelling, 1992, 63

$$S_n=S_0\exp[-a(\lg n)^2]$$

式中，S是包含以$n/2<N\leqslant n$为间隔的N个个体的种群的数量。

生态区数量分类模型

马明东，陈东立：四川三江流域及岷江上游生态区数量分类。自然资源，1992，2

(1) 分区生态变量的选择：

1) 各生态县林木干物质产量P_{tsv}模型：

$$P_{tsv}=3000\left[1-e^{-0.000965(V-20)}\right]$$

2) 生物产量转换为木材产量H的模型：

$$H=\frac{0.6P_{tsv}(1+M_g)}{W_g}$$

式中，M_g为木材含水量；W_g为湿材单位体积重量。

(2) 三江流域及岷江上游生态区的数量分类：

1) 原始数据标准化处理模型：

$$S_j=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum\left(x_{ij}-x_j\right)^2}$$

2) 各县(市)之间相似性测度——欧氏距离模型：

$$D_{ij(2)}=\sqrt{\sum\left(x_{ij}-x_{jk}\right)^2}$$

游隼的适度种群模型

Wootton J T, Bell D A：加利福尼亚游隼的适度种群模型——生存能力和管理策略。Ecological Applications, 1992, 2(3)

(1) 下面的模型不包括游隼的空间分布结构：

$$\begin{bmatrix}F_{t+1}\\ N_{t+1}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & yb\\ r & s\end{bmatrix}\begin{bmatrix}F_t\\ N_t\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}yI/2\\ 0\end{bmatrix}$$

式中，F_t是在时间t没有领地的雌游隼的数目；N_t是在时间t有领地的雌游隼成对的数目；b是区域雌游隼中羽毛已经丰满的年幼雌游隼的成对数目；y是能存活到1岁的雏鸟的概率；r是1岁鸟类能存活并且恢复到饲养数目的概率；s是2岁或者更老的鸟类每年的存活概率；I是每年被释放的饲养雏鸟的总数。

(2) 由于区域的游隼数是不变的（$N_t=N_{t+1}$），可以推出下面的等式：

$$1=ryb+s+ryI/(2N)$$

式中，N是在游隼总数不变的情况下，成对的区域雌游隼的数目。

(3) 通过使用一个迁移率联接两个游隼总数，来

说明繁殖成功差异的一个扩展模型：

$$\begin{bmatrix} F_{n,t+1} \\ N_{n,t+1} \\ F_{s,t+1} \\ N_{s,t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & y_n b_n & 0 & 0 \\ r_n h & s_n & r_n mc & 0 \\ 0 & 0 & 0 & y_s b_s \\ r_s mc & 0 & r_s h & s_s \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_{n,t} \\ N_{n,t} \\ F_{s,t} \\ N_{s,t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f y_n I/2 \\ 0 \\ (1-f) y_s I/2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

式中，下标 n 和 s 分别指北方和南方；m 是离开一个样体而没有饲养的雌游隼的概率；c 是存活迁移的概率；h 是群体中剩余的概率；f 是人工饲养的雏鸟融入北方人口的比例。因为总的区域游隼数量大小不变，这个方程有解：

$$1 = \frac{\left[1 - y_n r_n b_n (1-m) - s_n\right]\left[1 - y_s r_s b_s (1-m) - s_s\right]}{m^2 c^2 y_n y_s r_n r_s b_n b_s}$$

乱流扩散模型

康文星，田大伦：杉木人工林蒸散规律的研究及乱流扩散法应用的探讨．植物生态学与地植物学学报，1992，16(4)

$$\phi_E = -\rho k_W \frac{dq}{dz}$$

$$E = \int_{(A)} \int_{(t)} \phi_E \, dA dt$$

式中，ϕ_E 为水汽扩散通量；k_W 为水汽乱流扩散系数；$\frac{dq}{dz}$ 为比湿梯度；E 为输送的水汽量；A 为集水区面积；t 为时间；ρ 为空气密度。

森林草原放牧模型

Agarwal M, Shukla A, Pal V N：森林草原放牧和保护．Ecological Modelling, 1993 ,69

如果 $G(t)$ ，$U(t)$ 分别是牧草生物量和牲畜种群的密度，则森林草原的放牧模型为：

$$\frac{\partial G}{\partial t} = r_G \left(1 - \frac{G}{K}\right) G - \alpha_1 U G$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = Q + U\left(-s_0 + \alpha_2 G\right)$$

式中，r_G 是牧草生物量的生长率；K 是对应于牧草生物量的森林草原承载力；Q 是牲畜种群从圈养进入草原的迁移率；α_1 是牧草生物量的损耗率系数；a_2 是放牧期间，对应于牧草的消耗，有蹄类动物的生长率；s_0 是草原上有蹄类动物的死亡率

复杂森林景观中物种守恒的生态经济模型

Liu J：ECOLECON——一个复杂森林景观中物种守恒的生态学-经济学模型 Ecological Modelling, 1993, 69

(1) 成本：

对于纸浆用木材：

$$I_d = 0.01 \times [17.702 - 9.9114 \times \lg(\text{tract_size})] V_{ppa}$$

对于锯木块：

$$I_d = 0.01 \times [17.702 - 9.9114 \times \lg(\text{tract_size})] V_{cpa}$$

对于锯材原木：

$$I_d = 0.01 \times [17.702 - 9.9114 \times \lg(\text{tract_size})] V_{spa}$$

式中，I_d 是收入的减少；V_{ppa}、V_{cpa} 和 V_{spa} 分别是一英亩土地上纸浆用木材、锯木块和锯材原木的体积。

(2) 净收入：

净收益值(V_{np})：

$$V_{np} = \sum_{t=0}^{n} \frac{R_t - C_t}{(1+i)^t}$$

式中，t 是相对于给定的参照年份 0 的未来年数；n 是一个轮伐期中的年数；R_t 是年份 t 的收益；C_t 是年份 t 的成本；i 是贴现率。

土地期望值(V_{le})：

$$V_{le} = V_{np} + \{V_{np} / [(1+i)^n - 1]\}$$

投入产出模型

刘玉萃，赵伟：河南开封淀粉厂生态经济示范工程结构模型与投入产出模型的研究．生态学杂志，1993，12(2)

投入模型：$\left(1 - \sum_{i=1}^{n} b_{ij}\right) u_j = z_j$

产出模型：$\left(1 - \sum_{j=1}^{n} a_{ij}\right) x_i = y_i$

$(i, j = 1, 2 \cdots, 9)$

式中，z 为系统外输入；u 为总投入；x 为总产出；y 为最终输出；a_{ij} 为各系统间的直接消耗系数，它表明

j 子系统对 i 子系统产出的消耗需求比例；b_{ij} 为各子系统之间的直接投入系数，表示 i 系统产出对 j 子系统投入占 j 子系统投入的比例。

森林经营方案的反馈控制模型

李春干：森林经营方案实施的反馈控制模型．自然资源学报，1994，9(1)

1961 年，美国学者 A.Chames 和 W.W.Cooper 在其名著《管理模型及线性规划的工业应用》中提出了目标规划(P_d)的有关概念和数学模型，尔后 Yuji Ijiri 等对 P_d 加以改进和完善。目标规划模型具有如下一般形式：

$$\min Z=\sum_{k=1}^{k}Pk\sum_{l=1}^{l}(W_{kl}^{-}d_e^{-}+W_{kl}^{+}d_e^{-})$$

$$\sum_{l=1}^{n}C_1^{(1)}X_1+d_1^{-}-d_1^{+}=gi\quad(i=1,2,\cdots,L)$$

$$\sum_{l=1}^{n}a_{ij}X_j=b_1\qquad(i=1,2,\cdots,m)$$

依据 P_d 建立森林经营方案实施反馈控制模型如下：

设定：P 为经营方案的经理期年数；LL 为龄级期年数；AN 为最低收获年龄；M 为经营方案已经实施的年数；L 为控制期年数；A^0_i 为经营方案实施初期林分各年龄面积分布($i=1,2,\cdots,N$)；A^1_i 为经营方案实施 m 年后林分各年龄面积分布($i=1,2,\cdots,N,\cdots,N+m$)；$A^2_i$ 为控制期末林分各年龄面积分布 ($i=1,2,\cdots,N+m+1$)；SP_i 为经营方案规划的各年度造林面积（$i=1,2,\cdots,p$)；SF_i 为实施 m 年中各年度实际造林面积 ($i=1,2,\cdots,m$)；SC_i 为控制期内各年度计划造林面积 ($i=1,2,\cdots,l$)；d 为幼林抚育最高年限；h_i 为第 i 年龄幼林抚育次数($i=1,2,\cdots,d$)；TP_i 为经营方案规划的各年度幼林抚育作业面积 ($i=1,2,\cdots,p$)；TF_i 为经营方案实施 m 年中各年度实际完成的幼林抚育作业面积 ($i=1,2,\cdots,m$)；TC_i 为控制期内各年度幼林抚育作业面积 ($i=1,2,\cdots,l$)；$TC=\sum_{i-1}^{d}SC_i\times h_1$；$CP_i$ 为经营方案规划的各年度森林收获作业面积($i=1,2,\cdots,p$)；CF_{ij} 为经营方案实施 m 年中第 i 年采伐第 j 年龄林分的面积 ($i=1,\cdots,m$；$j=1,\cdots,N+i$)；CC_{ij} 为控制期内第 i 年收获第 j 年龄林分的面积($i=1,\cdots,m$；$j=1,\cdots,N+m+i$)。

于是，经过 m 年实施后，各年龄林分面积分布为：

$$A_S^1=\begin{cases}A_{m+i}=A_i-\sum_{k-1}^{m}CF_{k,\ k+i-1}\\ (i=1,2,\cdots,N\quad S>m)\\ A_i=SF_{m+1-i}-\sum_{i=1}^{i}CF_{m+2-j,\ i-j+1}\\ (i=1,2,\cdots,m\quad S\leqslant m)\end{cases}$$

再经过 m 年控制，各年龄林分面积分布为：

$$A_S^2=\begin{cases}A_{m+1-i}=A_i-\sum_{k=1}^{m}CF_{k,\ i+i-1}-\sum_{k=m+1}^{m+l}CC_{k,\ k+1}\\ (i=1,2,\cdots,N\\ m+1<S\leqslant N+m+1)\\ A_{m+i}=SF_{m+1-i}-\sum_{i=2}^{i}CF_{m+2-j,\ i-j+1}-\\ \sum_{i-2}^{i}CC_{m+i+2-j,\ i+m+1-j}\\ (i=m,\cdots,l\quad l<S\leqslant m+1)\\ A_i=SC_{1+l-i}-\sum_{j-2}^{i}CC_{1+2-j,\ i+1-j}\\ (i=1,\cdots,l\quad S<l)\end{cases}$$

有模型的约束条件：

①收获面积约束：

$$\sum_{l=1}^{N+m+i}CC_{ij}+d_1^{-}-d_1^{+}=CP_i\quad(i=1,2,\cdots,l)\qquad(1)$$

$$\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{N+m+i}CC_{ij}+d_{l+1}^{-}-d_{l+1}^{+}=\sum_{i=1}^{l}CP_i-\sum_{i=1}^{m}\left(CP_i-\sum_{j=1}^{N+i}CF_{ij}\right)\qquad(2)$$

(1) 式使控制期内各年度收获面积尽量接近经营方案规划的收获面积，(2)式使前 m 年经营方案实施过程中造成的收获面积偏差在控制期内得到纠正。

②期初面积约束：

$$\sum_{k=m+1}^{m+l}CC_{k,\ k+i-1}\leqslant A_i-\sum_{k=1}^{m}CF_{k,\ k+i-1}$$

$$(i=1,2,\cdots,N)\qquad(3)$$

$$\sum_{i=2}^{i}CC_{m+1+2-j,\ i+m+1-j}\leqslant$$

$$SF_{m+1-i}-\sum_{i-2}^{i}CF_{m+2-j,\ i+1-j}$$

$$(i=1+i,\cdots,m+1)\qquad(4)$$

$$\sum_{i=2}^{i} CC_{1+2-j,\ i+1-j} \le SC_{1+l-i}$$

$$(i = 2, \cdots, l) \tag{5}$$

(3)~(5)式保证了控制期内各年度收获面积不得大于控制期初林分面积和控制期内的造林面积。

③造林面积约束：

$$SC_{m+1} + d^-_{1+l+i} - d^+_{1+l+i} = SP_i \quad (i = 1, \cdots, l) \tag{6}$$

$$\sum_{i=1}^{i} SC_{m+1} + d^-_{2l+2+i} - d^+_{2l+2+i} =$$

$$\sum_{i=1}^{i} SP_{m+i} + \sum_{i=1}^{m} (SP_i - SF_i) \tag{7}$$

(6) 式保证了控制期内各年度造林面积接近于经营方案规划的造林面积，(7)式使前 m 年实施造成的更新造林面积偏差在控制期内得到纠正。

④林分抚育面积约束：

$$\sum_{i=1}^{d} SC_{i+1-j} \cdot h_j + d^-_{2l+2+i} - d^+_{2l+2+i} = TP_{m+1}$$

$$(i = j = 1, \cdots, l) \tag{8}$$

此约束使控制期内各年度幼林抚育作业面积接近于经营方案规划的幼林抚育作业面积。

⑤流量均横约束：

$$\sum_{i=1}^{N+m+i} SC_{ij} \cdot V_{ij} - \sum_{i=1}^{N+m-1+i} SC_{i+1,\ j} \cdot V_{i+1,\ j} + d^-_{N+2+i} - d^+_{N+2+i} = 0 \tag{9}$$

⑥收获年龄约束：

$$\sum_{i=1}^{l} \sum_{i=1}^{AN} CC_{ij} = 0 \tag{10}$$

$$\sum_{i=AN+1}^{N+m+1} CC_{ij} = \sum_{i=AN-m+1}^{N+m+1} \left(A_i - \sum_{k=1}^{m} CF_{k,\ k+i-1} \right) \tag{11}$$

$$CC_{iAN} = A_{AN+1-(m=i)} -$$

$$\sum_{k=1}^{M} CF_{k,\ AN+k-(m+i)} - \sum_{k=1}^{i-1} CC_{k,\ AN-m+k}$$

$$(i = 1, \cdots, l) \tag{12}$$

(10) 式构成了最低收获年龄约束，(11),(12)构成了最高收获年龄约束。

⑦期末龄级结构改善约束：

$$\sum_{j=1}^{ll} A^2_{1l\,i+j} - \sum_{j=1}^{ll} A^-_{1l\cdot(i-1)+j} + d^-_{4l+2+i} - d^+_{4l+2+i} = 0$$

$$(i = 1, \cdots, NN) \tag{13}$$

式中，NN 为保留的最大龄级数。

⑧产量优化约束：

$$\sum_{i=1}^{1} \sum_{j=1}^{N+m+i} CC_{ij} \cdot V_{ij} + d^-_{4l+2+NN} - d^+_{4l+2+NN} = 0 \tag{14}$$

式中，对于 V_{ij} 有：当 i=1 时，V_{ij} 为现实林分各年龄单位面积产量，即 $V_{ij}=V_j^0$；当 $i>2$ 时，V_{ij} 为 V_j^0 经过拟和后得到的各年龄林分单位面积产量。

除上述约束外，还有非负约束。

目标函数：

$$F_{\min} = \min \sum_{i=1}^{4l+1+NN} (d^-_i + d^+_i) + d^-_{4l+2+NN}$$

上述共组成了有 $\sum_{i=1}^{0} N + m + l - i$ 个系统变量，4l+NN+2 对偏差变量，N+m+61+NN+1 个约束的反馈控制模型。

香农(Shannon)平坦指数

Roth D S, Perfecto I, Rathcke B ：哥斯达黎加地面觅食蚂蚁多样性管理系统的效果。Ecological Applications, 1994, 4(3)

$$E = H / \ln S$$

式中，H 是香农多样性指数；S 是物种数量。

百分比相似性：

$$P = \sum_i \min(p_{1i}, p_{2i}) \times 100$$

式中，P 等于 1，2 号生境之间的相似性百分率；p_{1i} 等于群落样本 1 中物种 i 的比例；p_{2i} 等于群落样本 2 中物种 i 的比例。

投影格网的代表值（V_{np}）计算公式

Schulze P C, Leighton M, Peart D R：有选择性砍伐雨林中的强化栽培：一个生态学和经济学的结合分析　Ecological Applications, 1994, 4(3)

$$V_{np} = \sum_{t=0}^{n} \frac{b_t - c_t}{(1+d)^t}$$

式中，t 是未来的年数；b_t 是年份 t 计划的收益；c_t 是年份 t 计划的消耗；n 是计划持续的时间(在消耗-收益分析中需考虑的时期)；d 是贴现率(与当前的消耗-收

益相比、未来消耗-收益每年减少的比率)。

枯枝落叶积累量(L)

郭继勋，祝廷成：羊草草原枯枝落叶积累的研究——自然状态下枯枝落叶的积累及放牧、割草对积累量的影响 生态学报，1994，14(3)

$$L = \frac{P}{R}(1 - e^{-Rt}) + Loe^{-Rt}$$

式中，Lo 为初始积累量；P 为输入量；R 为分解速率；t 为时间。

群落多样性指数及易侵蚀系数

蒋有绪：林业建设工程的环境背景调查和环境质量评估 自然资源，1994，5

(1) 群落的多样性指数 H 模型：

$$H = -\sum_{i=1}^{m} P_i \lg P_i$$

式中，m 为群落类型；P_i 为第 i 个群落类型所占的面积比例。

(2) 易侵蚀系数 Q 模型：

$$Q = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} W_i C_{ij}$$

式中，n 为与侵蚀有较大影响的因子数；W_i 为第 i 个因子影响的权重；C_{ij} 为第 i 个因子第 j 个等级的影响评分值。

林业经营综合效益指标

蒋有绪：林业建设工程的环境环境预测与环境效益评估 自然资源，1994，6

(1) 绿化综合指数 Q 模型：

$$Q = \sum_{i=1}^{t} \frac{D_i}{M_i}$$

式中，D_i 为第 i 个绿化指标观测值或若干年的加权值；M_i 为绿化指标的经验值。

(2) 环境污染综合指数 P 模型：

$$P = \sum_{i=1}^{t} \frac{C_i}{S_i}$$

式中，C_i 为大气污染项目实测值或加权均值；S_i 为第 i 种污染项目国家颁定环境质量标准。

(3) 城市环境评定模型：

$$A_g = \sum W_i \frac{X_i - \bar{X}_i}{S_i}$$

式中，A_g 为城市环境质量数值；W_i 为第 i 个变量的权重值。

踩踏强度和植被反应关系模型

Cole D N：植被的实验性踩踏 I. 踩踏强度和植被反应之间的关系 The Journal of Applied Ecology, 1995, 32

(1) 对于一个丹麦的 *Empetrum nigrum* 沙丘生态系统，Hylgaard 和 Liddle (1981) 估算了一个 logistic 模型和常规形态之间的关系：

$$Y = \frac{A + B}{1 + \exp(C + DZ)}$$

式中，Y 表示植被的反应；$Z=\lg(X+1)$ 和 X 是踩踏的次数；A, B, C 和 D 是回归参数。

(2) 对于美国蒙大纳州的六种不同的植被类型，Cole (1987) 估算了一个渐进模型和常规形态之间的关系：

$$Y = A - B\exp(-CX)$$

式中，A, B 和 C 是回归参数。

(3) 踩踏强度和相对植被覆盖度之间的关系如下：

$$Y = A - BX + CX^2$$

这种关系通常提供了最佳的适应性，惟一的例外是 *Carex nigricans* 植被类型，对它来说模型为：

$$Y = A - BX - CX^2$$

式中，Y 是相对植被覆盖度；X 是踩踏强度；A、B、C 是回归参数。

弹性指数的计算公式

Cole D N：植被的实验性踩踏 II. 阻力和弹力的预测 The Journal of Applied Ecology, 1995, 32

弹性指数(I_L) 指一种植被类型在踩踏停止后的恢复能力；耐力指数(I_T)指一种植被类型忍耐一段时间的扰乱并恢复的能力；阻力指数(I_S)是被踩踏两周之后的平均相对植被覆盖度(%)。对于所有可能的踩踏强度：

$$I_L = \frac{I_T - I_S}{100 - I_S} \times 100$$

植被及植物群落退化指数的计算

Pietri D E D：作为阿根廷的家畜产业引起的景观恶化的指示器的植被空间配置、The Journal of Applied Ecology, 1995, 32

(1) 退化指数：

$$D=\frac{A+B+C}{13}\times 100w$$

式中，D 是退化指数；w 是不同植被类型的加权值。对于栅格中的每一个农村居民地，有三个属性来表示森林和草原单元，被表示为 A，B 和 C，基于每个单元覆盖的土地，分别表示植被的面积/周长(单位是 km)和被覆盖土地的结构规则性的量度。

(2) 植物群落退化指数：

$$V_s=\sum E_i\frac{20}{n}$$

式中，V_s 是植物群落退化指数，下标表示不同的农村居民地；E_i 是第 i 个指标的值；n 是指标数量。

资源动力学模型

Tiwari S, Ramaswamy R, Rao J S：资源管理模型中的适应性控制. Ecological Modelling, 1996, 84

(1) 开发之后的剩余资源种群个体数量为：

$$B_{t+1}=rB_t(1-B_t)[\alpha+(1-\alpha)e^{-E_t}]$$

式中，B_t 为时间 t 的种群个体数量；E_t 为时间 t 的收获量；α 为资源单位面积生物量中，从收获物中以残遗种保护区形式扣除之后的部分；r 为内在增长率。

(2) 当残遗种保护区被引入的时候，为了得到不变的收获量，平衡生物量会达到下面的值：

$$B_{eq}=1-\frac{1}{r[\alpha+(1-\alpha)e^{-E}]}$$

使收获量最大的残遗种保护区面积 $\hat{\alpha}$ 是：

$$\hat{\alpha}=\frac{2}{1+r}$$

最大收获量 $\hat{H}$ 为：

$$\hat{H}=\frac{(r-1)^2}{4r}$$

(3) 可变的收获策略：

为了使系统更快趋向于极值，可变的收获策略如下：

$$\dot{E}=\varepsilon\frac{\partial H}{\partial E}\exp\left(-\left|\frac{\partial H}{\partial E}\right|\right)$$

式中，E 为收获量；H 为收获，ε 是控制的力度。

一种离散的表示为：

$$E_{t+1}=E_t+\varepsilon\frac{\partial H}{\partial E}\exp\left(-\left|\frac{\partial H}{\partial E}\right|\right)$$

通过改变收获量，决策规则被修改了。

残遗种保护区面积的改变如下：

$$\alpha_{t+1}=\alpha_t+s(E_t-E_{t-1})$$

式中，s 是额外的控制力度参数。

野草湿地的退化模型

Shukla J B, Dubey B：生境改变对物种的影响——在印度Keoladeo国家公园的应用. Ecological Modelling, 1996, 86

$$\frac{dR}{dt}=r(B)R-\frac{r_0R^2}{K(B)}$$

$$\frac{dB}{dt}=r_1B\left(1-\frac{B}{K_1}\right)$$

式中，$R(t)$是湿地第一组分的生物量密度；$B(t)$在 t 时间野草生物量的密度。我们假定第一组分的增长系数 $r(B)$和相应的承载力 $K(B)$随着生物量密度 $B(t)$的增大而减小；r_1 是野草的增长率系数；K_1 是野草的承载力；r_0 是与 $B(t)$无关的增长率系数，$r(0)=r_0$。

通过控制野草来管理湿地公园的数学模型：

$$\frac{dR}{dt}=r(B)R-\frac{r_0R^2}{K(B)}$$

$$\frac{dB}{dt}=r_1B\left(1-\frac{B}{K_1}\right)-\alpha BP$$

$$\frac{dP}{dt}=\delta_1(B-B_c)-\delta_0P$$

式中，$P(t)$为在时间 t 用于消除过多野草的劳动密度；B_c 为对其他物种无害的 $B(t)$的临界值；δ_1 为 $P(t)$的增长率系数；δ_0 为它的衰减率系数；α 为一个系数。

杂草群落模型

Andujar J L G：杂草群落中高度管理措施不可能产生灭绝. Ecological Modelling, 1996, 91

管理措施(c) 的影响可以作为秧苗存活率的减少而被引入，因此修改后的模型如下：

$$N_{t+1}=(1-c)fgN_t(1+agN_t)^{-b}$$

式中，N_{t+1} 是结实性；g 是种子发芽的部分；f 被解释为忽略竞争时一个个体植株的种子集合；a 是密度依赖性竞争；b 是密度依赖性强度的量度。

栖息地镶嵌模型

Rafe R W, Usher M B, Jefferson R G：保护区的鸟类——地域面积和栖息地对物种丰富度的影响. The Journal of Applied Ecology, 1985, 22

(1) 含有 n 块栖息地的幂函数模型：

$$S=\sum_{i=1}^{n}c_iA_i^{z_i}$$

式中，S 是在 n 块栖息地中的物种总数；A_i 是第 i 块栖息地的面积；c_i 和 z_i 是第 i 块栖息地的常数。

(2) 指数模型：

$$S=\sum_{i=1}^{n}(a_i+b_i\lg A_i)$$

式中，b_i 是第 i 块栖息地的常数。

(3) 考虑到许多物种并不局限于一种栖息地类型，栖息地的镶嵌关系不得不加入"物种共享"的概念一这种关系有下面的形式：

$$S=\sum_{i=1}^{n}(a_i+b_i\lg A_i)-\sum_{\substack{i,j=1\\ i\neq j}}^{n}V_{ij}$$

式中，V_{ij} 是一个体现栖息地 i 和 j 之间物种重叠关系的函数。

华北落叶松生态适应性评价模型

李建国，陈国还，贺庆棠等：华北落叶松生态适应性的定量分析与评价. 生态学报，1996，16(2)

(1) 气候生态指标：

1) 温暖指数 I_w：

$$I_w=\sum_{i=1}^{12}T_i$$

式中，$i=1,2,\cdots,12$；T_i 为各月大于0℃的月平均温度。

2) 湿度指数 I_h 模型：

$$I_h=P/I_w$$

式中，P 为分布点的年降水量。

(2) 生态适应性的定量分析与评价模型：

1) 华北落叶松热量评价指数 $F(\theta_1)$：

$$F(\theta_1)=\frac{4(D_{max}-D)(D-D_{min})}{(D_{max}-D_{min})^2}$$

式中，D 为树木所在地＞0 ℃的年积温；D_{max}、D_{min} 分别为＞0 ℃的年积温范围的上、下限值。

2) 华北落叶松水分评价指数 $F(\theta_2)$：

$$F(\theta_2)=\frac{4(I_{hmax}-I_h)(I_h-I_{hmin})}{(I_{hmax}-I_{hmin})^2}$$

式中，I_{hmax}，I_{hmin} 分别为华北落叶松树木所在地的湿度指数的上、下限制。

3) 华北落叶松水热评价指数 $F(\theta_1,\theta_2)$：

$$F(\theta_1,\theta_2)=F(\theta_1)F(\theta_2)$$

样本单位虫口数阈的重要性模型

冯明光：麦长管蚜的序贯二项式分类抽样设计与管理决策优化：样本单位虫口数阈的重要性. 生态学报，1996，16(4)

(1) P_T-m 经验关系式：

1) P_T-m 经验关系式模型：

$$\ln(-\ln P_T)=a+b\ln m$$

2) 方差模型：

$$S^2_{\ln(-\ln P_T)}=\text{mse}/N+(\ln m-\text{avg}\ln m)^2s_b^2+\text{mse}$$

式中，mse 为拟合(1)式所产生的均方误；N 为观察值总数；avgln m 为回归分析中自变量 ln m 的平均值；s_b^2 为斜率 b 的方差。

(2) 概率模型：

$$P_T(m,k)=\sum_{i=0}^{T}P_i(m,k)$$

式中，k 为扩散参数。

环境潜在指数 E

许学工：黄河三角洲生态环境的评估和预警研究. 生态学报，1996，16(5)

$$E=\frac{P_u+N_d}{2}\left(\sum_{i=1}^{r}A_iK_{li}+\sum_{j=1}^{s}B_jK_{vj}\right)$$

式中，P_u 为城市人口百分比；N_d 为文盲人口百分比；K_l 为土地类型系数；K_v 为污染系数；r 为土地类型数；i 为第 i 种土地类型；s 为环境污染评价区数；j 为第 j 个评价区；A_i，B_i 分别为各类土地类型，各个评价区的面积权重，且 $\sum_{i=1}^{r}A_i=1$，$\sum_{j=1}^{s}B_j=1$。

土壤水分动态方程

梁宁，高琼：毛乌素沙地草地种植管理咨询系统的开发. 植物生态学报，1996，20(5)

$$\frac{dW}{dt}=P(t)\left[\lambda_v(\alpha)C+\lambda_s(\alpha)(1-C)\right]-$$

$$CI_{la}(t)E_p(t)\frac{W-W_L}{W_H-W_L}-g(C,r,W,\alpha)$$

式中，W 为土壤含水量；W_H、W_L 分别为土壤的最大持水量和最小含水量；$P(t)$为降水函数；λ_v、λ_s 为入渗系数；$I_{la}(t)$为植被叶面积指数；$E_p(t)$为潜在蒸腾速率；$g(C,r,W,\alpha)$为潜在渗漏函数。

红三叶-黑麦草人工草地刈割演替分析模型

钟华平、孙庆国、杜占池：川东中高山地区红三叶-黑麦草人工草地刈割演替研究．自然资源，1996，5

(1) 重要值模型：

$$I_i=\frac{F_i+C_i+D_i+H_i+B_i}{5}$$

式中，i 为某一种植物；F_i、C_i、D_i、H_i 和 B_i 分别为某一种植物的频度、相对盖度、相对密度、相对高度和相对生物量；I_i 为某一种植物的重要值。

(2) 样本的演替距离 L 模型：

$$L=\sum_{1}^{k}L_i$$

$$L_i=\left|R_{i0}-R_{ij}\right|a$$

式中，L_i 为样本中某一植物种 i 的演替距离；R_{i0} 为目标群落种的序号；R_{ij} 为每一样本的排序；a 为给定的距离系数。

森林合理年伐量综合评价模型

李春干：森林合理年伐量分析确定方法研究．自然资源学报，1997，12(1)

设第 i 种计算方法得到的某一测算单元的主伐量为 CM(i)、抚育间伐、补充主伐、低产林改造等其他采伐量之和为 JM，则用材林采伐总量 CCM(i)的构成为：

$$\text{CCM}(i)=\text{CM}(i)+\text{JM}\quad(i=1,2\cdots,n)$$

森林合理年伐量的分析确定就是从上述 n 个 CCM(i)中选出一个最符合森林永续利用原则的采伐量方案。

综合评价模型：

$$f(i)=\begin{cases}0 & (M_{\text{CM}}<\frac{2}{3}M_0,\text{CCM}(i)>RM)\\ \sum_{j=1}^{5}W(j)f_j(i) & (\text{其他})\end{cases}$$

$$(i=1,2\cdots,n)$$

显然，$F(i)$越大，说明其对应的采伐量越满足上述合理年伐量分析确定的 5 条原则，也就是采伐越合理。设：$F(l)=\max_i F(i)$，即 CCM(l)便为合理的森林年伐量，而 CM(l)为合理的主伐量。

炼山后杉木人工林地养分流失定量分析模型

林思祖：炼山对杉木人工幼林养分流失影响的定量研究．自然资源学报，1997，12(3)

(1) 养分流失量的预测模型：

$$Y=AX^B$$

式中，Y 为上述各养分的含量；X 为观测年时间序列；A，B 为参数。

(2) 年时间序列对各养分流失量效应的弹性系数(P_e)：

$$P_e=(\Delta y/y)/(\Delta x/x)=(\Delta y/\Delta x)/(y/x)=\beta$$

式中，当 $P_e>1$ 时，效应处于递增阶段；当 $P_e<0$ 时，效应处于负效应阶段；当 $0<P_e<1$ 时，效应处于递减阶段。

(3) 年时间序列对各养分流失量的边际量分析：

$$P_{mp}=\Delta y/\Delta x=\beta(y/x)=\beta\left(\sum y_i/\sum x_i\right)$$

降水终速度的求取及林地所接收的总动能模型

周国逸：几种常用造林树种冠层对降水动能分配及其生态效应分析．植物生态学报，1997，21(3)

(1) 降水终速度的求取：

1) 大气降水的终速度 V 模型：

$$V=\sqrt{D^2\rho_W g/6K}$$

式中，ρ_W 为水的密度；g 为重力加速度；D 为水滴的直径；K 为常数。

2) 冠滴水的终速度 V 模型：

$$\frac{dV}{dt}=g-\frac{6KV^3}{D^2\rho_W}$$

(2) 林地所接收到的总动能 K_{es} 模型：

$$K_{es}=K_{eg}+(1-\alpha)K_{ep}$$

式中，K_{eg} 和 K_{ep} 分别为冠滴水的动能和大气降水的总动能；α 为林冠的郁闭度。

流域生态经济区划方法

包晓斌：流域生态经济区划的应用研究. 自然资源，1997，5

（1）目标函数 $J_q(R,V)$模型：

$$J_q(R,V)=\sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c}(r_{ik})^q\|X_k-V_i\|^2$$

$$\|X_k-V_i\|=\left[\sum_{j=2}^{m}(X_{kj}-V_{ij})^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

式中，$\|X_k-V_i\|$为欧氏距离。

（2）鉴别聚类效果指标：

1）区分系数 $F_c(\underset{\sim}{R})$模型：

$$F_c(\underset{\sim}{R})=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{n}r_{ik}^2$$

2）标准分类熵 $H_c(\underset{\sim}{R})$模型：

$$H_c(\underset{\sim}{R})=-\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{n}r_{ik}\ln r_{ik}$$

山区生态环境质量评价指标体系

李晓秀：北京山区生态环境质量评价体系初探. 自然资源，1997，5

（1）水土流失程度综合指数 I_e模型：

$$I_e=\sum_{i=1}^{4}W_i F_i$$

式中，W_i为第 i 个分指标的权重值；F_i为某一分指标的分级量值。

（2）生物多样性程度 Q 模型：

$$Q=\frac{D}{M}$$

式中，D 为生物多样性观测值；M 为生物多样性背景值。

（3）单要素环境质量指数 I 模型：

$$I=\frac{P_i}{P_0}$$

式中，P_i为某污染物的监测值；P_0为某污染物的环境质量指标。

群落演替的数学模型

郝敦元，刘钟龄，王炜等：内蒙古草原退化群落恢复演替的研究——群落演替的数学模型. 植物生态学报，1997，21(6)

（1）单种群逻辑斯蒂模型：

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}=cp(1-p)-mp$$

式中，p 为种群的大小；c 为种群的拓殖率；m 为死亡率。

（2）两个种群组成的群落演替模型：

$$\frac{\mathrm{d}p_1}{\mathrm{d}t}=c_1p_1(1-p_1)-m_1p_1$$

$$\frac{\mathrm{d}p_2}{\mathrm{d}t}=c_2p_2(1-p_1-p_2)-c_1p_1p_2-m_2p_2$$

式中，$c_2p_2(1-p_1-p_2)$为种群 2 扩展的可能性；$c_1p_1p_2$表示已被 p_2占据的空间被种群 p_1侵占的可能性；m_2p_2表示由于 p_2个体死亡释放的空间占整个群落生存空间的比率。

（3）多种群组成的群落演替模型：

$$\frac{\mathrm{d}p_1}{\mathrm{d}t}=c_1p_1(1-p_1)-m_1p_1$$

$$\frac{\mathrm{d}p_2}{\mathrm{d}t}=c_2p_2(1-p_1-p_2)-c_1p_1p_2-m_2p_2$$

$$\vdots$$

$$\frac{\mathrm{d}p_n}{\mathrm{d}t}=c_np_n(1-\sum_{i=1}^{n}p_i)-p_n\sum_{j=1}^{n-1}c_jp_j-m_np_n$$

式中，p_1，p_2，…，p_n为群落种的全部种群，顺序的排列依照竞争优势顺序；c_i，m_i（i=1,2，…，n）为种群 p_i的拓殖率和死亡率。

加权植被反应率

Pickup G, Bastin G N, Chewings V H：非平衡牧场的土地退化的趋势确定. The Journal of Applied Ecology, 1998, 35

$$R=\sum_{i=1}^{n}(R_{gi}/R_{bi})A_{gi}\Big/\sum_{i=1}^{n}A_{gi}$$

式中，R 是加权植被反应率；R_g和 R_b分别是在高度放牧影响区和基准地区中对于每一个初始植被覆盖类型 i 的平均植被反应值；A_g 是被每一个初始植被覆盖类型占据的面积；n 是植被覆盖类型的数量。通过把相似的生长脉动之后的覆盖度的植被索引地图和一个生长脉动之前的覆盖度的植被索引地图相减，可以计算

计一个植被反应数据集合。

人工神经网络模型

洪伟，吴承祯，何东进：基于人工神经网络的森林资源管理模型研究 自然资源学报，1998，13(1)

BP 模型的特点是信号由输入层单向传输到输出层，同一层神经元之间不传递信息，每个神经元与邻层所有神经元相连，连结权重用 W_{ij} 表示，各神经元的作用函数为 Sigmoid 函数。设输入层有 p 个节点，输出层有 q 个节点，k-1 层的任意结点用 i 表示，k 层的任意节点用 j 表示，k +1 层的任意节点用 l 表示，则：

$$N_{\mathrm{ET}kj} = \sum_i W_{ij} O_{(k-1)i}$$

$$O_{kj} = f(N_{\mathrm{ET}kj})$$

式中，$O_{(k-1)i}$ 为 k-1 层节点 i 的输出；$N_{\mathrm{ET}kj}$ 为 k 层节点 j 的输入；O_{kj} 为 k 层节点 j 的输出。

设训练样本对为(X, Ye)，X 为 p 维向量，加到输入层；Ye 为 q 维向量，对应于期望的输出；网络的实际输出也是 q 维向量。网络在接受样本对的训练过程中，采用 BP 法，将输出值与实际期望值进行比较，并视其误差的方向与大小，反向调整各层节点的权值，使网络的输出值逐步逼近实际期望值，反复学习，直达到理想的误差精度为止。

样本平均方差的无偏估计

Nusser S M, Breidt F J, Fuller W A：自然资源动态调查的设计与评价 Ecological Applications, 1998, 8(2)

对在个体数为 N 的种群中进行随机抽样的样本容量 n，其样本平均方差 σ 的无偏估计为：

$$\sigma = \left(1 - \frac{n}{N}\right)\frac{s^2}{n}$$

式中，$s^2 = (n-1)^{-1}\sum_{i \in A}(y_i - \bar{y})^2$，$\bar{y} = n^{-1}\sum_{i \in A} y_i$，$y_i$ 是指种群中所选择的元素 i 的利益变量，A 是指样本标志集。

依赖于密度的增长率 $R(t)$

Root K V：生境质量、连通性及大灾难对受胁种的影响评价 Ecological Applications, 1998, 8(3)

$$R(t) = \frac{R_{\max} K}{[R_{\max} N(t)] - [N(t) + K]}$$

式中，$R_{\max}$ 是指最大增长速率；$N(t)$ 是指时间 t 时的杰伊斯灌木的树量；K 是指承载能力。

成本效益分析模型

Sharov A A, Liebhold A M：用屏障地带来控制外来有害物种传播的生物经济学 Ecological Applications, 1998, 8(3)

(1) 一项工程的当前价值等于用以时间为指数的函数模型加权而得到的净期望收入，这些收入可用该模型得到：

$$T_1 = \int_0^t P(t)\exp(-\alpha t)\,\mathrm{d}t$$

式中，$P(t)$ 是在时间 t 时的净收入；α 是贴现率；T 是时间范围。

(2) 整个工程从屏障带开始至当前时间 t_0 的总费用的当前价值等于：

$$T_{\mathrm{C}} = \int_{t_0}^{\infty} C(v(t))L(x)\exp\left[-\alpha(t-t_0)\right]\mathrm{d}t$$

式中，$C(v))L(x(t))$ 是在时间 t 时整个屏障地带的费用；x 是指距离，其变幅为 0 至 $x_{\max}$；$L(x)$ 种群向前传播的距离长度；$v(t)$ 传播速度。

(3) 从有害物种传播速度的减缓中受益的当前价值是：

$$T_{\mathrm{B}} = D\iint_S L(x)\exp[-\alpha(t-t_0)]\,\mathrm{d}t\mathrm{d}x$$

式中，D 是指单位面积单位时间内害虫引起的平均损害；S 是指未控制传播区与实际传播区之间的面积。

(4) 总的净收益的当前值：

$$T_{\mathrm{NB}} = \frac{D}{\alpha}\int_{x_0}^{x_{\max}} L(x)\exp\left[-\frac{\alpha(x-x_0)}{v_{\max}}\right]\mathrm{d}x - \int_{t_0}^{t}\left\{\left[\frac{D}{\alpha}v(t) + C(v(t))\right]L(x(t))\exp[-\alpha(t-t_0)]\right\}\mathrm{d}t$$

黄土高原小流域治理系统评估模型

李中魁：黄土高原小流域治理效益评价与系统评估研究——以宁夏西吉县黄家二岔为例 生态学报，1998，18(3)

1. 生产力

(1) 粮食亩产潜力实现率 R_y 模型：

$$R_y = (Y_c / Y_P) \times 100\%$$

式中，Y_c 为现有亩产量；Y_P 为潜在亩产量。

(2) 收入递增率 In 模型：

$$In = \left[(X_n / X_0)^{1/n} - 1\right] \times 100\%$$

式中，X_n，X_0分别为小流域第 n 年和基础年的净产值；n 为年数。

2. 均衡性

(1) 生态经济系统结构势 H 模型：

$$H=\left\{\frac{1}{\frac{1}{n}\left[\sum\left(R_{ci}-\bar{R}C\right)^2\right]^{1/2}}\right\}^{n/5}$$

式中，$R_{ci}=E_{oi}/E_{ci}$，为第 i 个子系统投入的有效产出率，E_{oi}，E_{ci}分别为第 i 个子系统有效产出和综合投入；$\bar{R}$ 为 R_{ci}的平均值。

(2) 效益协调系数 λ 模型：

$$\lambda=27X_1X_2X_3/\left(X_1+X_2-X_3\right)^4$$

式中，$X_i(i=1, 2, 3)$分别为生态效益、经济效益和社会效益的评价值。

3. 稳定性

(1) 系统抗逆力 P_r模型：

$$P_r=P_d/P_N$$

式中，P_d，P_N分别为灾年和正常年小流域产值。

(2) 系统稳定性 E_s模型：

$$E_S=\frac{1}{\left(\sum_{i=1}^{n}\left|Q_i-\bar{Q}_i\right|/n\right)^{1/n}}$$

式中，Q_i为第 i 年有用能量产出；$\bar{Q}_i$ 为研究时段有用能量产出均值；n 为年数。

4. 持续性

(1) 持续性系数 E_L模型：

$$E_L=\left(E_n/E_0\right)^{1/n}$$

式中，E_n，E_0分别为第 n 年和基础年的经济效益系数，$E_n=\sum_{i=1}^{n}Q_i\Big/\sum_{i=1}^{n}P_i$，$Q_i$ 为第 i 年有用量产出，P_i为第 i 年有用量投入，n 为年数。

(2) 系统发展速率 E_K模型：

$$E_K=1-\left(Q_0/Q_n\right)^{1/n}$$

式中，Q_0，Q_n分别为基础年和第 n 年的生物产出和经济产出等有用能量的产出量；n 为年数。

森林生物量的估算模型

Fang J, Wang G G, Liu G et al：中国森林生物量：根据生物量与木材体积的关系所作的估测。Ecological Applications, 1998, 8(4)

(1) 中国所有主要森林类型与木材体积的简单线性关系：

$$y=av+b$$

式中，y 和 v 分别是现存生物量和现存木材体积，a 和 b 是某种森林类型的常数。

(2) 每种类型的森林总的森林生物量可用下式计算：

$$Y=\sum_{i=1}^{31}\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{5}A_{ijk}(av_{ijk}+b)$$

式中，v_{ijk}和A_{ijk}分别是$(i=1, \cdots, 31)$省、位置级为$(j=1, 2, 3)$、年龄级为$(k=1, \cdots, 5)$平均当前木材体积和总面积。

各种森林类型以面积加权的平均生物量密度通过下式可以得到：

$$d=\frac{1}{A}\sum_{i=1}^{31}\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{5}A_{ijk}(av_{ijk}+b)$$

式中，A 是各类森林的总面积。

郁闭森林覆盖度的变化分析模型

Grainger A：对于模拟热带开放森林的砍伐和退化的约束。Global Ecology and Biogeography, 1999, 8

(1) 森林地区(A_t)时间序列的多次回归模型：

$$A_t=A-(b_1x_1+b_2x_2+\cdots)+(c_1y_1+c_2y_2+\cdots)-(d_1z_1+d_2z_2+\cdots)$$

式中，A 是常数；x_i是驱动力，例如种群生长率、每头牲畜的收入、农作物价格；y_i是控制力，例如农业生产力；z_i是促进因子，例如公路通达状况。

(2) 每年森林砍伐率的(E_{df})的交叉组合多次回归模型：

$$E_{df}=\mathrm{A}+(b_1x_1+b_2x_2+\cdots)-(c_1y_1+c_2y_2+\cdots)+(d_1z_1+d_2z_2+\cdots)$$

(3) 森林覆盖度百分比的交叉组合多次回归模型：

$$F_c=\mathrm{A}-(b_1x_1+b_2x_2+\cdots)+(c_1y_1+c_2y_2+\cdots)$$

式中，x_i 是从前的森林土地被其他用途占据的数量，例如种群密度；y_i 是约束，例如农业生产力。

(4) 潮湿的热带地区的30个乡村的回归方程：

$$\ln E_{di} = -1.611 + 0.379 \ln R_{pg70\sim90} + 0.489 \ln A_{70\sim90}$$

$$R^2 = 0.52$$

式中，$R_{pg70\sim90}$ 是1970~1990年每年的种群生长率；$A_{170\sim90}$ 是1970~1990年被砍伐的地区。

森林监测方法

Biondi F：比较树的年轮年表和重复的木材详细目录作为森林监测的工具. Ecological Applications, 1999, 9(1)

(1) 松树年轮法：

$$\omega_t = [\oplus_i (wy_1^{-1} s^{-1})_{it}] + \alpha$$

式中，ω_t 是 t 年份的年表值；$\oplus_i$ 是 i 价值双倍重量粗略平均值，$i = 1, \cdots, n_t$（n_t 是包括年份 t 的被测样本的数目）；w 是交叉的有日期的年轮的宽度；y_1 是更改后的负指数或者直线；s 是在128年期间，缩减50%的三次光滑样条曲线；α 是在1和robust-mean年表的算数平均数之间的差异。

(2) 在ARSTAN软件程序中：

$$\omega_t = n_t^{-1} \sum_i (wy_2^{-1})_{it}$$

式中，y_2 是更改后的负指数或者是斜率≤0的直线。

这是最常见的方法，Douglass (1914)第一次提出，后来Fritts (1976)使之流行：

$$\omega_t = n_t^{-1} \sum_i [\lg(w_{it} + k) - y_{2it}]$$

式中，k 是一个常数，用来避免对0取对数。

(3) 欧洲树木年轮年代学者(Schweingruber, 1988)通常采用的一种方法：

$$\omega_t = n_t^{-1} \sum_i a_{it}$$

式中，a 是已知一个圆的横截面部分，由 w 计算得到的年轮环的面积，表示为 $a_t = \frac{\pi}{100} w_t \left(w_t + 2\sum_{i=0}^{t-1} w_i \right)$，$w_0$ 是木髓和最内圈被测年轮之间的距离。

对于树木增长量的估计，森林详细目录的与树木年轮学序列之间是有差异的，这种差异计算如下：

$$M_D(\%) = \frac{\sum_{t=1}^{n_t} \sum_{i=1}^{n_i} \left(100 \frac{P_{BAI1} - P_{BAI2}}{P_{BAI1}} \right)}{n_i n_t}$$

式中，M_D 是平均差额；P_{BAI1} 是10年期间，由年轮面积序列计算得来的基本面积的增加；P_{BAI2} 是由森林详细目录计算得来的基本面积的增加；n_i 是松树的数目；n_t 是时间间隔的数值。

美国淡水生态系统服务的经济价值评估方法

Wilson M A, Carpenter S R：美国淡水生态系统服务的经济价值评估. Ecological Applications, 1999, 9(3)

(1) 旅行费用法(COM)：

第 i 个人到地点 j 的旅行次数 V_{ij} 可用下式表示：

$$V_{ij} = f(C_{ij}, Q_j, M_i)$$

式中，C_{ij} 是指第 i 个人到地点 j 的旅行费用；Q_j 该地点的质量指数；M_i 是这个人的收入。随着 Q_j 的升高，V_{ij} 也将长高。这个回归方程是计算该地环境质量的边际美元价值的基础。

(2) 享乐主义法：

实践中，多数HP分析都使用一个统计模型来估测水质变量对观测点价格的影响，例如，湖边房屋的价格可决定于位置特征 S_i，附近特征 N_i 及环境变量 Q_i：

$$P_i = f(S_i, N_i, Q_i)$$

根据回归方程，环境变量的边际价值可估算为：

$$dP/dQ$$

种子萌发率(G_p)和萌发速率(G_{cr})

张志权：土壤种子库与矿业废弃地植被恢复研究 I. Leonard 瓶-罐装置在土壤种子库监测中的应用。生态学杂志，1999，18(3)

$$G_p = \frac{\sum n}{N} \times 100\%$$

$$G_{cr} = \frac{\sum n}{\sum (D\, n)} \times 100\%$$

式中，D 为从实验开始至每次记录到萌发种子时的天数；n 为每次所记录到的萌发种子数；N 为用于每一个试验的种子数。

Sigmoid 函数

李祚泳，彭荔红：基于人工神经网络的农业病虫害预测模型及其效果检验. 生态学报，1999，19(5)

$$f(x)=\frac{1}{1+\exp(-x)}$$

生态系统的优先恢复指数 I_{pr}

Palik B J, Goebel P C, Kirkman L K et al：用景观层级指导被干扰的生态系统的恢复 Ecological Applications, 2000, 10(1)

$$I_{pr}=[h(\%)+a(\%)+d(\%)]/3$$

式中，h 是指一个生态系统的历史范围，它用一个参考生态系统(如所有的被干扰后又恢复的生态系统)占据的景观的潜在百分比来表示；a 是一个生态系统残留的面积，它用当前景观中的一个生态系统占其历史面积的百分比来表示；d 是七个干扰类中的一个，它反映被选择的多边形与参考条件的相异百分比

森林结构变化的相似性百分比(P_S)

Miller C, Urban D L：火灾管理方案对内华达州混生松林的影响模型 Ecological Applications, 2000, 10(1)

$$P_s=\frac{2M_w}{M_a+M_b}\times 100$$

式中，M_a 是在模拟年 601~700 内平均总基本面积；M_b 是当前模拟年内总的基本面积；M_w 代表与两个相互比较的立地生物共有的物种组成，它可通过对与两个立地共有种的两个基本面积的较小值求和而得到；P_s=100 表示当前模拟年的物种组成与普通原生森林的组成相同；而 P_s=0 表示没有哪个来自原生森林中的种现在存在。

绿洲生态需水模型

梁季阳，蒋业放，成立等：柴达木盆地水资源决策支持系统的设计与开发研究 自然资源学报，2000，15(1)

$$V=E_u A_{pc}$$

$$G_{WD}=A_l E$$

式中，E_u 为单位面积植被需水量(蒸散发能力)；A_{pc} 为植被覆盖面积；A_l 为湖泊面积；E 为水面蒸发能力。

在约束条件下造林规划设计的数学模型

吴承祯，洪伟：模拟退火法优化约束条件下造林规划设计的研究 自然资源学报，2000，15(1)

目标函数：

$$Z=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}V_{ij}S_iC_jX_{ij} \tag{1}$$

约束条件：

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}(b_j+H_jN_{ij})X_{ij}S_i\leqslant 1\,600\,000 \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{n}N_{i1}S_iX_{i1}\leqslant 1\,800\,000 \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^{n}N_{i1}S_iX_{i1}\leqslant 1\,200\,000 \tag{4}$$

$$\sum_{i=1}^{n}V_{i1}S_iX_{i1}\leqslant 45\,000 \tag{5}$$

$$\sum_{j=1}^{m}X_{ij}=1 \quad 且 \quad X_{5,1}=X_{59,1}=1; \quad X_{10,2}=X_{51,2}=X_{96,2}=1 \tag{6}$$

$$X_{i1}=\begin{cases}0 & (第i小班不种杉木)\\ 1 & (第i小班种植杉木)\end{cases}$$

$$X_{i2}=\begin{cases}0 & (第i小班不种马尾松)\\ 1 & (第i小班种植马尾松)\end{cases}$$

式中，Z 为基准年是创造价值(元)；V_{ij} 为第 i 小班种植第 j 树种在基准年(20 年)时累计材积；S_i 为第 i 小班面积；C_j 为第 j 树种(包括间伐和主伐收获的木材)每立方米平均计算价格；X_{ij} 为第 i 小班种植第 j 树种的决策变量；N_{ij} 为第 i 小班种植第 j 树种的合理密度(需苗木株数)；n 为小班数；m 为造林树种数。

食物生产与土地人口容量的系统分析模型

牛叔文：甘肃省食物生产与土地人口容量的系统分析 生态学杂志，2000，19(1)

(1) 粮食增长模型：

$$F_1=(C_1+C_2R_it)R_a(R_w-C_3)\times\left(1+\frac{715.3}{e^{2.279\,33-0.002\,632\,6X_1}}\right)\times(1+R_s-C_3)(1+R_d)$$

式中，F_1 为粮食总产；X_1 为每 0.067hm² 耕地上投入的工业能；R_a 为粮食播种面积的变率；R_w 为灌溉农田面积增加速度；R_s 为科技进步贡献率；R_d 为气候波动和灾害影响；C_1 为初始年份的耕地面积；C_2 为灌溉农田相对于旱地的增产系数；C_3 为初始年份的科技进步贡献率。

(2) 副食增长模型：

$$F_2=(C_1+C_2R_iT)(1+R_1)\times$$
$$(1176.4+2.4X_2)(1+R_s-C_1)(1+R_d)$$

式中，F_2 为产出的副食折能；X_2 为农业人口的物质能量投入；R_f 为油料瓜菜果品饲草作物面积的变率。

(3) 人口承载量模型：

$$P_1=\frac{F_1}{S_i}$$
$$P_2=\frac{F_2}{J_i}$$
$$i=1,2,3,4$$

式中，P_1 为按人均占粮计算的人口数量；P_2 为按人均占副食计算的人口数量；S_i 为四个消费水平上的人口占粮；J_i 为四个消费水平上的人口副食折能。

边缘效应强度模型

彭少麟：南亚热带演替群落的边缘效应及其对森林片断化恢复的意义　生态学报，2000，20(1)

$$E=\frac{1}{X}\sum_{h=1}^{x}\frac{m(Y_h-Y_{h'})}{\sum_{i=1}^{m}(y_{hi}-y_{h'i})}$$

式中，m 为与边缘相邻的群落数；x 为用于测度强度的指标数；Y_h 为交错区里 t_0 时第 h 个指标($h=1,2,\cdots,x$)；$Y_{h'}$ 为 t_0 时的值；y_{hi} 为相邻的 i 个群落 t_1 时第 h 指标($i=1,2,\cdots,m$)；$y_{h'i}$ 为 t_0 时的值。

生态经济评价指数

张忠学，郭亚芬，任玉东：小流域生态经济系统的评价研究　水土保持通报，2000，20(1)

$$U_1=\sum_{i=1}^{13}R_iW_{1i}$$
$$U_2=\sum_{i=14}^{19}R_iW_{2i}$$
$$U_3=\sum_{i=20}^{26}R_iW_{3i}$$
$$U=\sum_{i=1}^{26}R_iW_i$$

式中，U_1 为初级生产子系统评价指数；U_2 为次级生产子系统评价指数；U_3 为加工生产子系统评价指数；R_i 为基础评价指标模糊隶属度；W_{1i}、W_{2i} 和 W_{3i} 分别为基础评价指标对 3 个生产子系统的权重向量；W_i 为基础评价指标对生态经济系统的组合权重向量。

林分密度 N 与平均直径 D 的关系模型

曾德慧，姜凤岐，范志平等：沙地樟子松人工林自然稀疏规律　生态学报，2000，20(2)

$$N=aD^b$$

式中，a，b 为常数。

树的规划点模式

Zenner E K：太平洋东北松林中残留树是否可以增加结构的复杂性　Ecological Applications，2000，10(3)

(1) 至最近点的期望距离与测试区内树的实际数量有关：

$$CE_{\exp}=\frac{1}{2\sqrt{N/A}}+\left(0.051+\frac{0.041}{\sqrt{N}}\right)\frac{L}{N}$$

其标准误差的计算式为：

$$CE_{se}=\frac{\sqrt{0.07A+0.037L\sqrt{A/L}}}{N}$$

式中，N 是指测试区树的数量；A 是地块面积(m^2)；L 是指地块的周长。

z 测试是用来测试与随机模式的重要性偏差，即：

$$z=\frac{CE_{obs}-CE_{\exp}}{CE_{se}}$$

式中，CE_{obs} 是指树间平均距离的观测值，如果 $|z|<1.96$，可认为树是随机分布的；$z<-1.96$ 表示树处于丛生模式；$z>1.96$ 表示树处于均衡分布模式。

(2) 新的结构复杂性指数：

结构复杂性指数等于用不规则三角网(N_{ti})的总表面积(I^*_{sc})去除以所有三角形的水平投影面积：

$$I_{sc}=\frac{I^*_{sc}}{A_T}$$

式中，A_T 是所有三角形的水平投影面积，并且 $I^*_{sc}=\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{2}|a\times b|$，$i=1,\cdots,N$ 是指测试区三角形的数量，$|a\times b|$ 是指具有坐标 $a=(x_b-x_a,y_b-y_a,z_b-z_a)$ 的向量 AB 的矢积与具有坐标 $b=(x_c-x_a,y_c-y_a,z_c-z_a)$ 的向量 AC 的矢积的绝对值。

森林倒木的形成及其储量动态模型

代力民，徐振邦，陈华：阔叶红松倒木储存量的变化规律　生态学报，2000，20(3)

(1) 现有倒木的储量分解动态模型：

$$W = \sum_{j=1}^{N} \sum_{i=1}^{m} G_{ji} P_{ji}^{n}$$

$$(i = 1, 2, \cdots, m)$$

$$(j = 1, 2, \cdots, N)$$

式中，W 为现有倒木的动态储量；G 为现有倒木生物量或干重；P 为倒木分解到确定状态时的分解率；m 为倒木数量；N 为倒木种数；j，i 分别为倒木树种和数量的序号；n 为分解年龄。

(2) 倒木年输入量的储量分解动态模型：

$$T = \sum_{j=1}^{N} \sum_{i=1}^{m} H_{ji} \frac{1 - P_{ji}^{n}}{P_{ji}^{-1} - 1}$$

式中，T 为林地倒木年输入量的分解动态；H 为倒木的年输入量；P 为倒木分解到确定腐烂程度时的分解率；m 为倒木数量；i 为倒木数量的序号；j 为倒木树种序号。

(3) 倒木储量 Z 动态模型：

$$Z = W + T$$

对虾生产量测定模型

周一兵，刘亚军：虾池生态系能量收支和流动的初步分析，生态学报，2000，20(3)

(1) 存池量模型：

$$M = \frac{0.2667\,KNS}{\pi D^2 E}$$

式中，M 为虾池存苗尾数；D 为捕虾网直径；S 为虾池面积；N 为捕到虾的总尾数；E 为打网数量；K 为水深逃逸系数。

(2) 生产量模型：

$$P_{\text{shrT}} = \sum (N_t\,\Delta W) + \sum \frac{1}{2} \Delta N \Delta W$$

式中，P_{shrT} 为生长期的生产量；N_t 为测量时间 t 时的种群数量；ΔW、ΔN 为测量间隔期间的个体平均增量；$N_t\,\Delta W$ 为各阶段的生物量增长；$\frac{1}{2}\Delta N\,\Delta W$ 为各阶段的死亡量。

衡量可持续发展的新指标

李利锋，成升魁：生态占用——衡量可持续发展的新指标，自然资源学报，2000，15(4)

(1) 追踪资源消耗和废物消纳：

$$A_j = \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i}{P_{ei}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{P_i + I_i + E_i}{P_{ei}}$$

$$(j = 1, 2, 3, \cdots, 6)$$

式中，A_j 为生态系统的面积；P_{ei} 为生态生产力；C_i 为资源消费量；P_i 为资源生产量；E_i 为资源出口量；I_i 为资源进口量。

(2) 产量调整面积：

$$A_j = \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i}{P_{ei}\,F_{yi}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{P_i + I_i - E_i}{P_{ei}\,F_{yi}}$$

$$(j = 1, 2, 3, \cdots, 6)$$

式中，F_{yi} 表示产量调整因子。

(3) 等量化处理后的生态占用公式：

$$F_e = \sum_{j=1}^{6} A_j\,Q_{ej} \qquad (j = 1, 2, 3, \cdots, 6)$$

式中，Q_{ej} 为等量化因子。

林土壤改良效益评价模型

沈慧，姜凤岐，杜晓军：水土保持林土壤改良效益评价研究 生态学报，2000，20(5)

1. 指标数据处理

(1) 对于水土保持林土壤改良效益成正效应的指标模型：

$$C_{ij} = \frac{V_{ij}}{V_{j\max}}$$

$$(i = 1, 2, \cdots, 20)$$

$$(j = 1, 2, \cdots, 9)$$

式中，C_{ij} 为第 i 样地第 j 指标实测值归一化处理后的相对值；V_{ij} 为第 i 样地第 j 指标实测值；$V_{j\max}$ 为第 j 指标的最大值。

(2) 对于水土保持林土壤改良效益成负效应的指标模型：

$$C_{ij} = \frac{V_{j\max} - V_{ij}}{V_{j\max} - V_{j\min}}$$

$$(i = 1, 2, \cdots, 20)$$

$$(j = 1, 2, \cdots, 9)$$

式中，C_{ij} 为第 i 样地第 j 指标实测值归一化处理后的相对值；V_{ij} 为第 i 样地第 j 指标实测值；$V_{j\max}$ 为第 j 指标的最大值；$V_{j\min}$ 为第 j 指标的最小值。

(3) 对土壤 pH 值的处理模型：

$$C_{i4}=1-\frac{|V_{i4}-7.00|}{7.00} \qquad (i=1,2,\cdots,20)$$

式中，C_{i4}为第i样地pH实测值归一化处理后的相对值；V_{i4}为第i样地pH实测值；7.00为中性pH

2. 效益评价计算

(1) 准效益指数模型：

$$Y_{i1}=\sum W_j C_{ij}$$

$$(i=1,2,\cdots,20;\ j=1,2,3,4)$$

$$Y_{i2}=\sum W_j C_{ij}$$

$$(i=1,2,\cdots,20;\ j=1,2,5,6,7)$$

$$Y_{i3}=\sum W_j C_{ij} \quad (i=1,2,\cdots,20;\ j=1,2,5,8,9)$$

式中，Y_{i1}, Y_{i2}和Y_{i3}分别为第i样地的土壤肥力指数、抗蚀性能指数和抗冲性能指数；W_j为第j指标的层次单排序权值；C_{ij}为第i样地第j指标实测值归一化处理后的相对数值

(2) 水土保持林土壤改良效益评价综合指数模型：

$$Y_i=\sum W_j Y_{ij} \quad (j=1,2,3)$$

$$Y_i=\sum_{j=1}^{9} W_j C_{ij}$$

$$(i=1,2,\cdots,20)$$

式中，Y_i为第i样地的土壤改良效益评价综合指数；W_j为第j指标的层次总排序权值；Y_{ij}为第i样地第j准效益(土壤肥力、土壤抗蚀性能和抗冲性能)指数；C_{ij}为第i样地第j指标实测值归一化处理后的相对数值

景观动态模型

Higgins S I, Richardson D M, Cowling R M：用景观动态模型来规划外来入侵植物的管理 Ecological Applications, 2000, 10(6)

(1) x米以外的一颗植物入侵所产生的新植物的潜在数量(R)：

$$R=S_{TR}(D_{BH}/10)^2\frac{1}{n}\exp(-dx^3)$$

式中，S_{TR}是标准新增植物的总数(每个10cm胸径的新个体的数量)；D_{BH}是指胸径；d是离差；n是一个标准化数字

(2) 死亡率：

幸存于火灾的可能性(P_s)可用下式表示：

$$P_s=l+(u-l)/l+\exp(b-D_{BH}/v)$$

式中，l是指一棵胸径小于b的树存活的可能性；u是指一棵胸径大于b的树存活的可能性；v表示u和l之间的斜率。

生态系统服务价值模型

谢高地，张钇锂，鲁春霞等：中国自然草地生态系统服务价值. 自然资源学报，2001，16(1)

(1) 单价订正：

$$p_{ij}=(b_j/B)P_i$$

式中，P_{ij}为订正后的单位面积生态服务价值. i=1, 2,…,17, 分别代表气体管理、气候管理、干扰调节、水管理、水供应、侵蚀控制和沉积物保存、土壤习惯成、营养循环、废物处理、授粉、生物控制、栖息地、食物生产、原材料、基因资源等不同类型的生态系统服务价值；i=1,2,…,18, 分别代表温性草甸草原类、温性草原类、温性荒漠草原类、高寒草甸草原类、高寒草原类、高寒荒漠草原类、温性草原化荒漠类、温性荒漠类、高寒荒漠类、暖性草丛类、暖性灌草丛类、热性草丛类、热性灌草丛类、干热稀树灌草丛类、低地草甸类、山地草甸类、高寒草甸类、沼泽类18种草地类型；P_i为生态系统服务价值参考基准单价；b_j为j类草地的生物量；B为我国草地单位面积平均生物量

(2) j类草地生态系统服务总价值：

$$V_j=\sum_{i=1}^{17} A_j p_{ij}$$

式中，V_j为上述j草地生态系统服务总价值；A_j为j草地类的面积；p_{ij}为j草地类的i类生态服务单价

(3) 区域草地生态系统服务功能计算：

$$V=\sum_{i=1}^{17}\sum_{j=1}^{18} A_j p_{ij}$$

式中，V为区域草地生态系统服务总价值；A_j为j草地类的面积；p_{ij}为j草地类的i类生态服务单价

土层抗张强度的增量$\Delta\tau_T$

周跃，张军，骆华松等：松属、青冈属乔木侧根的强度在防护林固土护坡作用中的意义 植物生态学报，2001，25(1)

$$\Delta\tau_T - \sum F_B/A$$

$$\sum F_B = \frac{\pi}{4}\sum(n_i D_i^2 T_i)$$

$$T_i = \frac{F_{Bi}}{A_{Ri}}$$

式中，n_i为侧根在直径组 i 中给定面积内的所有侧根数；F_{Bi}为直径组 i 中所有单根的平均拉断力 F_B；D_i、T_i分别为直径 i 组中侧根的平均直径和平均抗张强度；A_{Ri}为 i 组中侧根的平均横断面积；A 为各土层深度间隔的给定截面面积。

具有天敌捕食的鼠害综合防治模型

成定平：具有天敌捕食的鼠害综合防治模型研究．生态学杂志，2001，20(2)

(1) 鼠害综合防治模型：

$$X(t+1) = AX(t) + Bu(t)$$

$$A = \begin{bmatrix} e^r\left(1-\frac{pR}{w}\mu b\right) & -\frac{pR}{w}\mu\left(1-\frac{pR}{w}\mu b\right) \\ e^r\mu b & \mu\left(1-\frac{pR}{w}\mu b\right) \end{bmatrix}$$

$$X(t) = (n_t, N_t)^T$$

$$B = (-k, -d)^T$$

式中，A 为系统的状态矩阵；$X(t)$为系统的状态向量；n_t为第 t 期鼠类的种群数量；r 为其瞬时增长率；w 为个体平均体重；N_t为第 t 期天敌类群数量；μ 为其周线增长率；b 为天敌迁移率；p 为天敌年均食量；R 为天敌食物中鼠的比例；$k>0$ 为投入单位防治货币可灭杀鼠数；$d>0$ 为间接致使天敌死亡数；$u(t)$为人工防治费用，是系统的控制变量。

(2) 鼠害最优防治模型：

$$\begin{cases} \min J = \frac{1}{2}\sum_{t=0}^{M}\left[\tilde{X}^T(t)\tilde{Q}\tilde{X}(t) + u^2(t)\right] \\ \text{s.t.}\quad \tilde{X}(t+1) = \tilde{A}\tilde{X}(t) + \tilde{B}u(t) \\ \qquad \tilde{X}(0)\text{已知}\quad (0 \le t \le M) \end{cases}$$

式中，$\tilde{X}(t) = \begin{bmatrix} X(t) \\ X_e \end{bmatrix}$；$\tilde{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix}$；$\tilde{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}$；$\tilde{Q} = \begin{bmatrix} I_2 & -I_2 \\ -I_2 & I_2 \end{bmatrix}$；$I_2$为二阶单位矩阵。

预警评价指标体系

刘邵权，陈国阶，陈治谏：农村聚落生态环境预警——以万州区茨竹乡次竹五组为例．生态学报，2001，21(2)

(1) 经济环境指标——产出稳定性 T 模型：

$$T = \frac{N(N-1)}{\sum_{i=1}^{k} n_i(n_i-1)}$$

式中，N 为聚落总收入；n_i为第 i 个子系统的收入；k 为子系统数量。

(2) 社会环境指标：

1) 薪柴供给能力 S 模型：

$$S = \frac{0.8M\ N}{\sum_{i=1}^{k} m_i\ n_i}$$

式中，M，N 分别为聚落薪柴年净生长量和热值；m_i，n_i为第 i 种燃料的数量和热值。

2) 生活用水保证率 W 模型：

$$W = \frac{\sum_{i=1}^{k} p_i\ d_i}{365P}$$

式中，p_i，d_i分别为第 i 类人口数量及保证用水日数；P 为聚落人口数。

(3) 生态环境指标：

1) 土壤侵蚀相对强度 I_s模型：

$$I_s = \frac{\sum_{i=1}^{k} E_i}{\sum_{i=1}^{k} E_{i'}}$$

式中，E_i为第 i 种土地利用方式所产生侵蚀量；$E_{i'}$为聚落内第 i 类土壤允许侵蚀量。

2) 涵蓄水量 I_w模型：

$$I_w = \frac{\sum_{i=1}^{k} l_i\ w_i}{L\,W_{max}}$$

式中，l_i，w_i为第 i 种用地面积和涵蓄水源量；L 为聚落总面积；W_{max}为顶级植物群落涵蓄水源量。

(4) 环境质量评价与预警模式：

质量评价模型：

$$E(t)=\sum_{i=1}^{n}W_i(t)E_i(t)$$

式中，n 为评价因子或子系统数量；$W_i(t)$为第 i 个因子或子系统的权重；$E_i(t)$为第 i 个因子或子系统在 t 时刻质量评分值；$E(t)$为 t 时刻聚落生态环境质量综合评价分值。

火灾频率对林分结构与动态过程影响模型

Peterson D W, Reich P B：热带橡树大草原中的特定火灾：火灾频率对林分结构与动态过程的影响．Ecological Applications，2001，11(3)

（1）平均相对增长率（R_{GR}）：

$$R_{GR}=(\ln x_2-\ln x_1)/(t_2-t_1)$$

式中，x_1 和 x_2 分别是指在时间 t_1 和 t_2 时的密度或基本面积。

（2）小橡树死亡可能性的对数回归模型：

$$\ln\{\pi(F,D)/[1-\pi(F,D)]\}=$$
$$(0.056-0.04)(F-5.68)^2+1.24(D-3.46)^2$$

式中，F 是在 1984 到 1995 年中观测到的火灾次数；D 是指树的胸径的自然对数；$\pi(F,D)$ 是指在一个特定的火灾频率及树径的情况下死亡的可能性。

生态脆弱性指数 EFI

王让会，樊自立：干旱区内陆河流域生态脆弱性评价——以新疆塔里木河流域为例．生态学杂志，2001，20(3)

$$EFI=\frac{\sum_{i=1}^{n}C_iI_i}{\sum_{i=1}^{n}C_i}$$

$$I_i=\log_{\frac{\max T_i}{\min T_i}}\frac{\alpha_i}{\min T_i}$$

式中，α_i 为实际值；T_i 为阈值；C_i 为敏感因子权重。

湿地区域生态风险评价模型

付在毅，许学工，林辉平等：辽河三角洲湿地区域生态风险评价．生态学报，2001，21(3)

（1）暴露和危害分析——生态指数模型：

$$E_i=\sum\lambda_jU_{ji}$$

式中，E_i 为 i 类生境的生态指数；λ_j 为 j 指标的权重；U_{ji} 为 i 类生境的 j 指标。

（2）区域生态风险综合评价——风险值模型：

$$R_k=\sum\lambda_jP_{kj}R_{ek}R_{fk}$$

式中，R_k 为第 k 个风险小区的风险值；λ_j 为 j 类风险源对区域生态风险作用的权重值；P_{kj} 为第 k 个风险小区内 j 类风险源发生的概率；R_{ek}、R_{fk} 分别为第 k 个风险小区的生态指数和脆弱度指数。

流域水质管理系统模型

林秋奇，段舜山，韩博平：流域水质管理系统构建的理论、方法和实践．生态学杂志，2001，20(4)

（1）流域水文模型——土壤水流基本方程：

1）非饱和土壤水流基本方程：

$$\frac{\partial\rho_w\theta}{\partial t}=-\frac{\partial\rho_wq_x}{\partial x}+\frac{\partial\rho_wq_y}{\partial y}+\frac{\partial\rho_wq_z}{\partial z}$$

式中，$q=-K(\theta)\nabla\Psi$；q 为单位时间通过单位面积土壤的水量；$K(\theta)$ 为非饱和导水率；Ψ 为土水势；θ 为土壤含水率。

2）饱和土壤水流基本方程：

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left[K_x(\theta)\frac{\partial\phi}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[K_y(\theta)\frac{\partial\phi}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[K_z(\theta)\frac{\partial\phi}{\partial z}\right]$$

式中，$\frac{\partial\theta}{\partial t}=0$；$q=-K_s\nabla\Psi$；$q$ 为单位时间通过单位面积土壤的水量；K_s 为饱和导水率。

（2）流域土壤侵蚀模型：

$$\frac{\partial s}{\partial x}+\frac{\partial z}{\partial t}=A$$

式中，s 为实际的泥沙迁移率；x 为距分水岭或单元区域上端的水平距离；z 为地面高程；t 为经历的时间；A 为外部泥沙的增加率。

（3）流域非点源污染模型——一维的土壤中溶质迁移基本方程：

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t}=\sum\frac{\partial}{\partial x_i}\left[D_{sh}(v,\theta)\frac{\partial c}{\partial x_i}\right]+\sum\frac{\partial(q_ic)}{\partial x_i}+s$$

式中，θ 为土壤含水率；c 为污染物浓度；D_{sh} 为水动力弥散系数；$\frac{\partial c}{\partial x_i}$ 为 i 方向浓度梯度；q_i 为 i 方向水通量；s 为单位时间内单位体积土壤中所生成或消失的溶质的质量。

（4）水质模型——稳态的三维的迁移转化方程：

$$\frac{\partial c}{\partial t}=-\sum u_i\frac{\partial c}{\partial x_i}+$$

$$\sum\frac{\partial}{\partial x_i}\left[(D_i+E_m+E_T)\frac{\partial c}{\partial x_i}\right]+s$$

式中，$i=1,2,3$ 代表三个坐标方向；u_i 为 i 方向的流速；E_m 为分子扩散系数；E_T 为湍流扩散系数；D_i 为 i 方向的弥散系数；s 为源或汇。

(5) 河流水质模型————基本稳态平流-弥散方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}=-\frac{1}{A}\frac{\partial(QC)}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(AD\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{S_{in}}{A}+\frac{S_{out}}{A}$$

$$\frac{S_{in}}{A}=\frac{dC}{dt}$$

式中，S_{in} 为水体系内部水质变量 C 的来源和漏源；S_{in} 为水体系外部的来源和漏源。

(6) 水库湖泊水质模型：

$$\frac{\partial c}{\partial t}+(K_0-R_s)\frac{\partial c}{\partial Z}=$$

$$\frac{1}{A}\frac{\partial}{\partial Z}\left(AD_z\frac{\partial c}{\partial Z}\right)+\frac{S}{A}+\frac{1}{A}(q_{in}C_{in}-q_{out}C_{out})$$

式中，R_s 为某一水质参数的沉降速率；A 为断面面积；Z 为深度；S 为源和汇；D_z 为 z 方向的弥散系数；q_{in},q_{out},C_{in},C_{out} 分别为输入、输出水流流速和浓度。

植被净第一性生产力 WBINPP 模型

徐继填等：中国生态系统生产力区划．地理学报，2001，56(4)

$$P_{op}=2.55\,E_{ga}\,e^{-4\ 209\ 22\ \ 1.9665I_a}$$

式中，E_{ga} 为生长际的实际蒸散；I_a 为干燥度指数。

生态系统生产力等级分值的计算公式

徐继填等：中国生态系统生产力区划．地理学报，2001，56(4)

$$D_i=\alpha G+\sum P_{npij}(1-\alpha)R_{ij}$$

式中，D_i 为 i 地区耕地生产力与植被 P_{np} 等级图相叠加所的生产力等级分值；α 为不同生态系统类型修正系数，农田型赋值 0.6、综合型 0.4、森林型、牧草型与复合型 0.2；G 为 i 地区耕地生产力等级赋分；P_{npij} 为 i 地区植被 P_{np} 等级值；R_{ij} 为 i 地区内植被 P_{np} 第 j 等级区域所占 i 地区的面积比例。

碱化草地群落恢复演替空间格局动态分析模型

李晓平，徐斌，王秀山等：碱化草地群落恢复演替空间格局动态分析．生态学报，2001，21(6)

(1) Korcak 相对斑块化指数 B 模型：

$$N_{(area>a)}=C\,a^{-B}$$

式中，a 为面积大小；N 为面积大于 a 的岛屿数目；C 为常数。

(2) 斑块灭绝的非随机动力学模型：

$$r(t)=cons\tan t\times t^{1-2H}$$
$$H=1-B$$

式中，t 为物种占据斑块的时间；$r(t)$ 为斑块灭绝速率；H 为估计渐进灭绝过程的指数，表示斑块时间上的稳定性(持久性)。

第二十八章　其他生态环境模型

立地碳预算模型

Biscoe P V，Scott R K，Monteith J L：大麦和它的环境 III. 立地的碳预算 Journal of Applied Ecology，1975，12

（1）净光合作用：

24 小时中植冠的净光合作用为：

$$P(n)^{*}=\sum(P_{a}-R_{a})+\sum R_{s}$$

式中，P_a 是白天观察到的由大气到农作物向下的 CO_2 流；R_a 是夜间农作物-土壤系统 CO_2 释放到大气的流失率；R_s 是土壤有机体的呼吸作用；$\sum(P_a-R_a)$ 是 24 小时植冠和大气之间的 CO_2 净交换；$\sum R_s$ 是 24 小时中土壤微生物体使用的 CO_2 总量。

（2）每天的毛光合作用：

$$P(g)=\sum_{l}(P_{a}+R_{s})+\sum R_{l}=\sum_{l}(P_{a}+R_{s})+1.4R_{d}2^{(T_{l}-T_{d})/10}$$

式中，$\sum_l$ 表示一天的总和；$\sum R_l$ 是一天中的"暗"呼吸作用；R_d 是当平均组织温度是 T_d 时，夜晚呼吸的 CO_2 总量；T_l 是一天里的平均组织温度。

估算野生植被对路边环境变更的感受模型

Cole D N：估算野生植被对路边环境变更的感受性 Journal of Applied Ecology，1978，15

（1）道路附近植被覆盖百分比的降低（R_C）：

$$R_{C}=\frac{(C_{2}-C_{1})100}{C_{2}}$$

式中，C_1 是样方 1(距离道路较近的样方)中的覆盖百分比；C_2 是样方 2 中的覆盖百分比。

（2）物种组成的变化可以通过植物差异系数(D_f)来定量化：

$$D_{f}=0.5\sum\left|p_{1}-p_{2}\right|$$

式中，p_1 是样方 1 中给定物种的重要性值；p_2 是样方 2 中同一物种的重要性值；$\sum$表示所有物种的总和

物种-区域关系的变化分析方程

Usher M B：自然保护区中高等植物的物种－区域关系的变化 Journal of Applied Ecology，1979，16

$$S=cA^{z}$$

式中，S 是物种数量；A 是面积；c 和 z 是正常数。

环境评价模型

Shaeffer D L：可应用于环境评价模型中的模型评估方法 Ecological Modelling 1980,8

（1）乘数链模型(MCMs)：

$$z=A\frac{x_{1}x_{2}\cdots x_{m}}{y_{1}y_{2}\cdots y_{n}}$$

式中，z 可以是污染物的浓度或者是影响健康的指标；x_i 和 y_i 表示可测量的环境因子的量，例如浓度；比值 x_i/y_i 可以是生物体内积累因子或者是浓度比值；A 是一个常数。MCMs 经常被用来估算经过陆地和水环境的污染物的迁移。

（2）乘数链模型的统计学发展过程：

Aitchison 和 Brown (1969)给出了对于一个呈对数正态分布的变量 z 的算术平均数 $\bar{z}$、中数 z_m 和最可能值(众数) z_p 的公式：

$$\bar{z}=\exp\left(\mu+\frac{\sigma^{2}}{2}\right)$$

$$z_{m}=\exp(\mu)$$

$$z_{p}=\exp(\mu-\sigma^{2})$$

式中，参数 μ 和 σ 由相应的参数；$\mu_{x_i},\sigma_{x_i},\mu_{y_i},\sigma_{y_i}$ 决定，它们分别定义了 x_i 和 y_i 的对数正态分布；所有这些量之间的关系如下：

$$\mu=\ln A+\sum_{i=1}^{m}\mu_{x_{i}}-\sum_{i=1}^{n}\mu_{y_{i}}$$

$$\sigma^{2}=\sum_{i=1}^{m}\sigma_{x_{i}}^{2}+\sum_{i=1}^{n}\sigma_{y_{i}}^{2}$$

Shaeffer (1979),Shaeffer 和 Hoffman(1979)指出：

$$P(z \leqslant \bar{z})=1/2\left[1+\operatorname{erf}\left(\frac{\sigma}{2\sqrt{2}}\right)\right]$$

$$P(z \leqslant z_m)=1/2$$

$$P(z \leqslant z_p)=1/2\left[1-\operatorname{erf}\left(\frac{\sigma}{\sqrt{2}}\right)\right]$$

式中，erf 是误差函数；$P(z \leqslant \bar{z})$、$P(z \leqslant z_m)$、$P(z \leqslant z_p)$ 表示小于 $\bar{z}$、z_m 和 z_p 的概率。在许多实际应用中，污染物 z 与某种环境介质中污染物浓度 χ 成比例。那些最大可允许浓度与 $\bar{z}$、z_m、z_p 和 $z_{99\%}$（有 99% 的概率不会被超过的值）之间的关系如下：

$$\chi_p:\chi_m:\chi_{avg}:\chi_{99\%}=1:e^{-\sigma^2}:e^{3\sigma^2/2}:e^{-(2.326-\sigma)\sigma}$$

Levins 回路分析法及其扩展模型

Flake R H：瞬时和周期扰动的 Levins 回路分析法的扩展 Ecological Modelling, 1980, 9

(1) Levins 考虑到用向量微分方程描述的系统的平衡点：

$$\mathrm{d}\boldsymbol{X}/\mathrm{d}t=f(\boldsymbol{X},\boldsymbol{C})$$

式中，状态元素 x_i 可以表示本地种群-丰富度和一个区室中的资源；$\boldsymbol{C}$ 是相关环境因子的向量，它可能突然从一个常数值集合转换到另一个常数值集合，引起区室平衡点的扰动；这个平衡点的扰动首先可以从线性方程中估算，即 $\mathrm{d}X/\mathrm{d}t=AX+b\delta C$，$\delta C$ 是 $\boldsymbol{C}$ 中的转换，向量 $\boldsymbol{X}$ 表示对初始没有扰动时平衡点的状态的偏移量。

(2) 如果线性系统是渐进稳定的，平衡点的转换是这个代数系统的解：

$$\boldsymbol{AX}=-b\delta\boldsymbol{C}$$

式中，A 是"区室矩阵"。

(3) Levins 将一个 $n\times n$ 矩阵的决定性扩展表示为：

$$\det_n=\sum_{m=1}^{n}(-1)^{r-m}L(m,n)$$

式中，$L(m,n)$ 是含有 n 个顶点的 m 个非接触回路中所有产品的总和。

估算最大可再生资源的方法

Uri N D：估算未发现的石油资源的工程学方法 Ecological Modelling, 1980, 10

(1) 从每年的生产记录 $\mathrm{d}Q_p/\mathrm{d}t$，可以获得累计产量 Q_p。由累计产量和已探明储量 Q_r 的值，某年累积探明发现 Q_d 被定义为：

$$Q_d=Q_p+Q_r$$

由此派生出：

$$\mathrm{d}Q_r/\mathrm{d}t=\mathrm{d}Q_d/\mathrm{d}t-\mathrm{d}Q_p/\mathrm{d}t$$

(2) 当已探明储量达到最大值时，已探明储量的增加率为 0，也就是说：

$$\mathrm{d}Q_r/\mathrm{d}t=0 \quad 且 \quad \mathrm{d}Q_p/\mathrm{d}t=\mathrm{d}Q_d/\mathrm{d}t$$

为了得到三条曲线的分析派生值，必须使它们适合外在的函数关系。

吸收差异模型

黄会一，张有标，张春兴等：木本植物对大气气态污染物吸收净化作用的研究．生态学报，1981，1(4)

$$F=\frac{m\sum_{i=1}(A_i-\bar{X})^2/(a-1)}{\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{m}(X_{ij}-A_i)^2/a(m-1)}$$

式中，A_i 为各级变量的平均值；i 为各级变量的顺序；a 为级数；j 为各级变量的顺序；m 为各级的项数。

森林对氢氟化物的吸收模型

Murphy C E, Ares J J：森林对氢氟化物的吸收 Ecological Modelling, 1982, 15

(1) 模拟氟化物在森林中的沉积：

从叶片周围空气中到叶片表面和叶肉中的氟化物汇点的氟化物(例如 HF)的流量为：

$$F=\frac{sC_a}{s(r_a+r_s)+r_i}+\frac{C_a}{r_a+r_s+r_c}$$

式中，F 是到叶片表面的氢氟化物的流量密度；s 是氢氟化物的溶解性；r_a 是空气动力学边界层阻力；r_s 是气孔阻力；r_i 是内部阻力；r_c 是表面表皮阻力；C_a 是氢氟化物的大气浓度。

(2) 模拟表面边界层和树冠中的迁移：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z}\left(K\frac{\mathrm{d}C_a}{\mathrm{d}z}\right)+S=0$$

式中，K 是气闭的紊流扩散率；z 是高度；S 是污染物质的沉积强度。

种子散布距离

Sharpe D M, Fields D E：气候与种子降落速度对种子随风散发的综合影响的模型与应用 Ecological Modelling. 1982.17

克里默(1971)指出，一颗种子在稳定运动的空气中降落，其传播的距离 D 由下式决定：

$$D = \bar{V}H / V_f$$

式中，$\bar{V}$ 是种子在其弹出路线上平均时间内的平均风速；H 是种子释放出来时的高度；V_f 是种子的降落速度。

河流污染的相似系数 r_{ij}

朱新源，刘来福，徐汝梅：应用模糊聚类分析对北京东南郊的河流污染状况进行分类，生态学报，1982，2(3)

$$r_{ij} = \frac{d_1}{d_1 + d_2} r_{ij}^{(1)} + \frac{d_2}{d_1 + d_2} r_{ij}^{(2)}$$

$$r_{ij}^{(1)} = \sum_{k=1}^{d_1} X'_{ik} X'_{jk} \Bigg/ \sqrt{\left(\sum_{k=1}^{d_1} X'^2_{ik}\right)\left(\sum_{k=1}^{d_1} X'^2_{jk}\right)}$$

$$r_{ij}^{(2)} = \sum_{k=1}^{d_2} \sum_{l=1}^{k} y_{ikl} y_{jkl} / d_2$$

$$X'_{ik} = X_{ik} / \sigma_k$$

式中，d_1、d_2 和 l 均表示采样点的指标；X_{ik} 表示第 i 个采样点第 k 项定量指标值；y_{ikl} 表示第 i 个采样点第 k 项定性指标第 l 类目的值；$r_{ij}^{(1)}, r_{ij}^{(2)}$ 分别表示第 i 和第 j 采样点在定量指标和定性指标上的相似系数；σ_k 表示第 k 项定量指标各采样点的观测数据的标准差。

土壤中残留农药 R 模型

蔡道基，杨佩芝，汪竞立等：有机氯农药在环境-生态系中的归趋与危害 生态学杂志，1983，1

$$R = QK + QK^2 + \cdots + QK^n$$

式中，Q 为当年施入土壤的农药；n 为施药年数；K 为残留系数。

过滤过程数学模型

Lassey K R：过滤过程概念层上的简单数学模型 Ecological Modelling, 1983,18

(1) 污染物守恒方程：

$$[\partial v / \partial w + (1/V)\partial v / \partial t] + \partial D_R / \partial t + \lambda_A D_R = 0$$

式中，w 是过滤器的深度；t 是时间；V 是流动速度；λ_A 是同化速度；$D_R(w,t)$ 是污染物渗透剖面面积；$v(w,t)$ 污染物的渗透通量。

(2) 污染渗透的拦截速率由下式决定：

$$\partial D_R / \partial t = \mu v - \lambda D_R$$

式中：μ 过滤参数；$\lambda = \lambda_A - \lambda_D$；$\lambda_D$ 是移出速率。

(3) 可饱和过滤器的过滤模型：

当被吸附物浓度 $D_R(w,t)$ 达到 D_0 时过滤效率的降低可采用过滤参数以下式来定量表达：

$$\mu = \zeta[D_0 - D_R(w,t)]$$

式中，D_0 表示过滤器中污染物吸附的饱和浓度。

越野火灾蔓延机制模拟模型

Green D G：在离散供应燃料的情况下火灾形成模拟，Ecological Modelling, 1983, 20

(1) 在接触模型中，点火模板含有数字 $t(X,Y)$，它代表从燃烧中心点 X 到引燃阵列中任意其他点 Y 所需的时间。对反转模型而言，这些时间由下式决定：

$$t(X,Y) = CM(1-e^2)/d(X,Y)(1-e\cos\theta)$$

式中，θ 是 Y 方向偏离 X 方向的角度(从顺风方向量起)；e 是椭圆模板的离心率；C 是常数；$d(X,Y)$ 是 Y 点至 X 的距离。

(2) 在常数接触模型中，火灾的发展由点火模板的重复扫描决定，每次扫描都将覆盖一个新的着火点。模板在扫描过程中，每一个受模板控制的未着火的点被点着的时间可利用下式进行更新：

$$T'(Y) = \min[T(Y), T(X) + t(X,Y)]$$

式中，$T(Y)$ 的初始值设为无穷大。

非点污染源排放单位物质响应函数

Zingales F, Marani A, Rinaldo A et al：非点污染源排放的单位物质响应函数的概念模型，Ecological Modelling, 1984, 26

(1) 流域对降雨的转移函数：

$$u(t;n,K) = [AK/\Gamma(n)](Kt)^{n-1}\exp(-Kt)$$

$$Q(t;n,K) = \int_0^t u(t-\tau;n,K) f(\tau)\mathrm{d}\tau$$

式中，$u(t;n,K)$ 是单位水位曲线，它是参数 n 和 K 的函数；$\Gamma(n)$ 是自变数 n 的伽马函数；A 是流域的面积；$f(\tau)$ 是脉动雨量图；$Q(t;n,K)$ 是对应于 $f(\tau)$ 分布的净降水量的水排放。

(2) 单位物质响应函数(UMRF)

$$qX(t;n,K,hX,C_EX) = C_EX\{Q(t;n,K) - [K/(K+hX)]^n Q(t;n,K+hX)\}$$

$$C(t;n,K,hX,C_EX)=C_EX\{1-[K/(K+hX)]^n[Q(t;n,K+hX)/Q(t;n,K)]\}$$

$$ZX(t;n,K,hX,C_EX)=C_EX\{V(t;n,K)-[K/(K+hX)]^nV(t;n,K+hX)\}$$

式中，X 是第 x 个污染物指数；qX 是第 x 个污染物流动速率；C_E 是均衡浓度；C_EX 是由排水 Q 引起的第 X 个污染物流动速率；C 是第 X 污染物浓度；ZX 是在时间 t 的第 X 污染物总负荷；$V(t;n,K)$ 是在时间 t 的水容量；hX 是第 X 污染物的物质转移系数。

物种替代模拟模型

Dostálková I, Kindlmann P, Rejmánek M：生态演替过程中环境梯度的物种替代的模拟. Ecological Modelling, 1984, 26

(1) r-K 扩散系统：

考虑两个物种 S_1 (r-物种)和 S_2 (K-物种)：

$$\frac{\partial N_1}{\partial t}=h_1\Delta N_1+N_1\left[r_1\exp\frac{(x-P_1)^2}{1000}-a_{11}N_1-a_{12}N_2\right]$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t}=h_2\Delta N_2+N_2\left[r_2\exp\frac{(x-P_2)^2}{1000}-a_{21}N_1-a_{22}N_2\right]$$

式中，$N_i(t)$ 是 S_i 在时间 t 的密度；令 $r_1/r_2>a_{11}/a_{21}$，令 S_2 为更好的竞争者 $(a_{12}>a_{21})$。

(2) r-K 扩散系统和 r-物种含时滞的自动抑制：

$$\frac{\partial N_1}{\partial t}=h_1\Delta N_1+N_1[r_1\exp\frac{(x-P_1)^2}{1000}-a_{11}\frac{999+e^{\lambda(t-\tau_1x)}}{1000}N_1-a_{12}N_2]$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t}=h_2\Delta N_2+N_2\left[r_2\exp\frac{(x-P_2)^2}{1000}-a_{21}N_1-a_{22}N_2\right]$$

$$\frac{\partial\lambda}{\partial t}=a_{31}N_1-a_{32}\lambda$$

传热系数

王培洲：毛皮传热性简易测定方法. 生态学杂志，1984，5

(1) 热传递器的冷却因素 F：

$$F=3CPV/S$$

式中，C 为某物体质量的比热；P 为密度；V 为体积；S 为面积。

(2) 冷却系数 h：

$$h=\frac{F}{36.5-t_2'}$$

式中，t_2' 为环境温度。

斜面太阳辐射强度 I

毕伯钧：人参气候生态及适宜栽培地选择的研究. 植物生态学与地植物学丛刊，1985，9(2)

$$I=I_0\{[1-(\sin\alpha\cos\beta\cos\phi+\cos\alpha\sin\phi)^2]^{1/2}\cdot\cos(Wt+a)\cos\delta+(\sin\alpha\cos\beta\cos\phi+\cos\alpha\sin\phi)\sin\delta\}$$

$$a=\arctan\frac{\sin\alpha\sin\beta}{\cos\alpha\cos\phi-\sin\alpha\cos\beta\sin\phi}$$

式中，I_0 为与太阳光线相垂直于平面上辐射强度；α 为坡度；β 为斜面方位角；ϕ 为纬度；δ 为太阳赤纬；W 为地球自转角速度；t 为时角。

综合决策模型

周电辉：模糊数学在研究定西地区胡麻产量预报中的应用. 植物生态学与地植物学丛刊，1985，9(2)

$$Y_j=\frac{1}{4}\left[\bigvee_{i=1}^{m}(a_i\wedge X_{ij})+\bigvee_{i=1}^{m}(a_iX_{ij})+\sum_{i=1}^{m}(a_i\wedge X_{ij})\sum_{i=1}^{m}(a_iX_{ij})\right]$$

$$(j=1,2,\cdots,N)$$

式中，Y_j 为胡麻产量；X_{ij} 为相应的气候因子；a_i 为各种气候因子相应的权重。

荆条灌丛分类的模糊聚类模型

张金屯：模糊聚类在荆条灌丛分类中的应用. 植物生态学与地植物学丛刊，1985，9(4)

(1) 距离系数 d_{jk} 模型：

$$d_{jk}=\sqrt{\sum_{i=1}^{30}(X_{ij}-X_{ik})^2}$$

$$(i=1,2,\cdots,30)$$

$$(j,k=1,2,\cdots,41)$$

式中，X_{ij} 和 X_{ik} 分别为原始数据矩阵中第 i 行第 j 列和第 i 行第 k 列元素。

(2) 相似系数 r_{jk} 模型：

$$r_{jk}=1-\frac{d_{jk}}{M}$$

$$(j,k=1,2,\cdots,41)$$

式中，r_{jk} 为样方 j 和 k 的相似系数；M 为一适当的常数，以使 $0<r_{jk}\leqslant 1$。

街道绿化减噪模型

董志林：森林生态学(八)：森林生态系统和环境保护(2) 生态学杂志,1985，5

$$L_n=20\lg\frac{d+\sum_{I}^{Z}B_m+\sum_{I}^{Z}A_m}{d}+1.5Z+\beta\sum_{I}^{Z}B_m$$

式中，L_n 为通过林带和一定距离后噪声的衰减值(分贝)；d 为噪声源至绿化带的距离(m)；Z 为林带带数；B_m 为林带宽度(m)；A_m 为林带间距(m)；β 为林带吸收系数(dB·m^{-1})

杉木人工林辐射状况分析模型

曾士余，朱劲伟：杉木人工林辐射状况的初步分析. 生态学杂志,1985，5

(1) 直接辐射通量 $S_{\alpha\beta}$ 模型：

$$S_{\alpha\beta}=I_0(U\sin\delta+V\cos\delta\cos t+\sin\beta\sin\alpha\cos\delta\sin t)$$

式中,$U=\sin\varphi\cos\alpha-\cos\varphi\sin\alpha\cos\beta$;$V=\cos\varphi\cos\alpha+\sin\varphi\sin\alpha\cos\beta$；$\alpha$，$\beta$ 分别为坡度和坡向；t 为太阳时角；φ 为地理纬度；δ 为太阳赤纬；I_0 为直射光强度.

(2) 散射辐射通量 D_α 模型：

$$D_\alpha=D(1+\cos\alpha)/2$$

式中，D 为到达水平面上的散射辐射通量。

(3) 辐射日总量 $Q_{\alpha\beta}$ 模型：

$$Q_{\alpha\beta}=S_{\alpha\beta}+D_\alpha$$

物质循环和生长分析模型

Leiler I：物质循环和生长中的污染问题. Ecological Modelling, 1986, 31

(1) 生态系统微分方程：

$$\dot N=-\frac{\alpha N}{N+a}W+\beta_L P+\gamma L+O_1(N,P,L,W)$$

$$\dot P=-\beta_L P-\beta_D P+\frac{\alpha N}{N+a}W+O_2(N,P,L,W)$$

$$\dot L=-\gamma L+\beta_D P+O_3(N,P,L,W)$$

$$\dot W=K(F(c)-W)W$$

式中，$N(t_0)=N_0$；$P(t_0)=P_0$；$L(t_0)=L_0$；$W(t_0)=W_0$；$c=\frac{P}{W+P}$；N 为时间 t 营养池中物质的总量；P 为时间 t 在植物体中合成的物质的总量；L 为时间 t 枯枝落叶和分解体中物质的总量；W 为时间 t 的纯干重(=干重-营养物质)；α 是最大吸收率；a 是半饱和常数；β_L 是滤取率；β_D 是死亡率，γ 是分解率；函数 $F(c)$ 表示物种的内在生长率；K 是常数；O_1，O_2 和 O_3 是代表进出三个区室的物质输出和输入的函数。

(2) 当系统保守时：

$$O_1(N,P,L,W)\equiv O_2(N,P,L,W)\equiv O_3(N,P,L,W)\equiv 0$$

(3) 系统的平衡点就是下面方程的解：

$$\frac{c}{1-c}F(c)=\frac{\gamma}{\beta_D+\gamma}\left[m-\frac{a\beta c}{\alpha-(\alpha-\beta)c}\right]$$

式中，$\beta=\beta_L+\beta_D$；$m=N_0+P_0+L_0$；c^* 是方程的解

(4) 系统的平衡点如下：

$$N_c=\frac{a\beta c^*}{\alpha-(\alpha+\beta)c^*}$$

$$P_c=\frac{c^*}{1-c^*}F(c^*)$$

$$W_c=F(c^*)$$

冲积平原的输入负载模型

Hart B T, Ottaway E M, Noller B N：在澳大利亚北部 Magela Creek 系统中，营养物质和示踪物的流动. Ecological Modelling, 1986, 31

$$L_t=\sum_i L_i\frac{Q_t}{\sum_i Q_i}$$

式中，L_t 是每年物质总负载量；L_i 是在洪水期 i 中运移的物质的负载量；Q_t 是每年总的流失量；Q_i 是在洪水期 i 中流失的体积；$\sum$ 表示整个样本洪水期的总和.

森林冠层辐射的数值模拟模型

王汉杰：森林冠层辐射的数值模拟. 生态学杂志，1986，5(2)

(1) 无散射模型：

$$U_d(h, j+1) = T(h)U_d(h, j)$$
$$U_c(h, j) = T(h)U_c(h, j+1)$$

式中，$U_d(h, j)$ 和 $U_c(h, j)$ 分别为第 j 层上因 h 方向的短波辐射引起的向下和向上的辐射通量；j 为层序号，冠层顶部为 1，底部为 n，林地为 $n+1$；$T(h)$为该层的透射率。

(2) 散射模型：

$$U_d(h', j+1) = T(h')U_d(h', j) + B(h')\sum_{h=1}^{q} I(h) \times \left\{ U_d(h, j)[r(1-\xi) + t\xi] + U_c(h, j+1)[t(1-\xi) + r\xi] \right\}$$

$$U_c(h', j) = T(h')U_c(h', j+1) + B(h')\sum_{h=1}^{q} I(h) \times \left\{ U_d(h, j)[t(1-\xi) + r\xi] + U_c(h, j+1)[r(1-\xi) + t\xi] \right\}$$

式中，h' 为散射的方向；ξ 为修正函数。

植物热值模型

祖元刚，张宏一：植物热值测定中的若干技术问题。生态学杂志，1986，5(4)

$$H = \frac{T(W + \Delta W) + E - (G_1 + G_2)}{M}$$

式中，H 为植物样品的热值；T 为校正后的实际温升；W 为内筒水重；E 为水当量；G_1 为引火丝的热值；G_2 为酸的生成热；M 为植物样品重量；ΔW 为水的比热校正。

采矿和侵蚀对生物量生产的影响的模拟模型

Rogowski A S, Weinrich B E：模拟采矿和侵蚀对生物量生产的影响 Ecological Modelling, 1987, 35

(1) 生产力指数 I_p：

$$I_p = \sum_{i=1}^{m} Pw_i(r)\prod_{j=1}^{n} x_{ij}$$

式中，$Pw_i(r)$ 是根分布函数；x_{ij} 是描述在 $i = 1,2,\cdots,m$ 土壤层中 $j = 1,2,\cdots,n$ 生长限制因子的函数。

(2) 理想化的根分布函数为：

$$Pw_i(r) = 0.152\int_0^r \ln\frac{R + \sqrt{R^2 + 6.45}}{r + \sqrt{r^2 + 6.45}}dr$$

式中，r 是剖面深度；R 是含有 99% 的根的深度。

(3) 估算生产力指数 (I_p)的替代方法

$$Ip_{\min} = \sum_{i=1}^{m} M_{wloi}\min(x_{ij})$$

式中，M_{wloi} 是根分布函数；$\min(x_{ij})$ 表示有最小限制的生长因子。

$$M_{woli} = \frac{\prod_{j=1}^{n} x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}\prod_{j=1}^{n} x_{ij}}$$

(4) 生长限制因子植物可用水分 (W_{paf})：

$$W_{paf} = W_a/W_{acrit} \quad (W_a < W_{acrit})$$
$$W_{paf} = 1.0 \quad (W_a \geq W_{acrit})$$

式中，W_a 是植物可用水分的实际数量；W_{acrit} 是特定生境中植物最小需水量的现实估算，且 $W_{acrit} = YE/\beta$，Y 是干物质生产，E 是平均潜在蒸发，β 是一个依赖于一种谷物生长的系数。

(5) 生长限制因子通风多孔性 P_{af}：

$$P_{af} = \frac{\int_0^r [1/P_{acrit}(r)]dr}{\int_0^r [1/P_{aa}(r)]dr}$$

式中，$P_{acrit}(r)$ 是土壤的临界通风多孔性；$P_{aa}(r)$ 是土壤通风多孔性的实际值

(6) pH 生长限制因子(F_{pH})：

$$F_{pH} = 3.9321 - (pH - b) - 9.6098 - 0.3644(pH - b)^2$$

式中，pH 表示在 1:1 的水溶液中测得的酸度；b 是一个满足实验数据的系数

当 $b = 0$ 时：

$$F_{pH} = \begin{cases} 0 & (pH < 3.75) \\ 03.93pH - 9.61 - 0.36(pH)^2 & (3.75 < pH < 5.40) \\ 1.0 & (pH > 5.40) \end{cases}$$

当 $b = 1$：

$$F_{pH} = \begin{cases} 0 & (pH < 4.75) \\ 3.93(pH - 1) - 9.61 - 0.36(pH - 1)^2 & (4.75 < pH < 6.40) \\ 1.0 & (pH > 6.40) \end{cases}$$

大范围森林的区域碳储量模拟模型

Cropper W P, Jr, Ewel K C：大范围森林的区域碳储量模拟 Ecological Modelling, 1987, 36

(1) 沼泽松中碳积累的模拟：

$$\frac{dX_1}{dt}=\frac{M_1FX_1}{1+k_1X_1}-\sum a_{1j}X_1$$

式中，X_1是沼泽松的碳含量；M_1是没有施肥时光合作用的最大比率；F是施肥响应函数；k_1是限制碳积累的负反馈系数；a_{1j}是不变的线性转换系数。

(2) 下面这个方程用来计算F,描述了最大光合作用对施肥的反应：

$$F=1.0+\{0.05[1-\exp(-0.0317539P)]\}$$

式中，P是磷施肥率。

(3) 其他成分的模拟：

$$dX_i/dt=\sum a_{ji}X_j-\sum a_{ij}X_i$$

式中，X_i是沼泽松的其他成分的碳含量；a_{ij}是成分i到j的线性转换系数。

污染物地表浓度的高斯烟柱模型

Taylor J A, Simpson R W, Jakeman A J：预测高点源释放的二氧化硫浓度分布的混合模型 Ecological Modelling, 1987, 36

$$\chi(x,y,0,H)=\frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z u}\exp\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\exp\frac{-H^2}{2\sigma_z^2}$$

式中，$\chi(x,y,0,H)$是污染物地表浓度；x是水平风向距离；y是水平横风距离；Q是污染源强度；u是风速；σ_y和σ_z是横向和垂直的离差参数；H是烟柱的有效高度。

迈阿密模型

陈国南：用迈阿密模型测算我国生物生产量的初步尝试．自然资源学报，1987，2(3)

$$y_1=\frac{3000}{1+e^{1.42-0.141t}}$$

$$y_2=3000\left(1-e^{-0.000\,65p}\right)$$

式中，y_1为根据年均温计算的生物生产量($g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$)；$y_2$为根据年降水量计算的生物生产量($g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$)；$t$为年均温(℃)；$p$为年降水量(mm)；e为自然对数的底。

最后，根据李比希的限制因子定律，选取二者中最小值作为计算点的生物生产量。

生物与其环境的热交换模型

陆健健：能量生态学（二）：生物与其环境的热交换．生态学杂志，1987，6(3)

(1) 辐射与辐射热交换：

1) 发射的辐射能R_r模型：

$$R_r=\varepsilon\sigma T^4$$

式中，ε为发射率；σ为常数；T为辐射体的绝对温度。

2) 物体吸收的辐射量R模型：

$$R=AS$$

式中，A为表面吸收率；S为暴露于辐射下的表面积。

3) 长波净辐射量$R_{净}$模型：

$$R_{净}=\varepsilon_1\varepsilon_2\sigma\left(T_1^4-T_2^4\right)$$

式中，ε_1，ε_2分别为生物和其环境的发射率；T_1、T_2为相应的绝对温度。

(2) 对流热传导：

对流热传导方程：

$$H_C=h_CA(T_S-T_a)$$

式中，H_C为对流热传导总量；h_C为对流系数；A为对流表面面积；T_S为生物体表面的平均温度；T_a为生物体周围的空气温度。

(3) 传导热传递：

传导的基本方程：

$$H_K=h_K\,A/L(T_2-T_1)$$

式中，H_K为单位时间与面积传导的热量；h_K为传导系数；A为传导面积；L为传导厚度；T_1为生物表面温度；T_2为环境基底温度。

(4) 水汽和潜热传递：

1)绝对温度与水汽压的关系模型：

$$Q=4.62\times10^{-4}PT$$

式中，Q为绝对温度；P为水汽分压；T为空气的绝对温度。

2)生物体表面蒸发水分模型：

$$E=\left(P_S-P_a\right)/r_v$$

式中，E为单位时间内蒸发的水分；P_S、P_a分别为生物体表和生物体周围流动空气中的水汽分压；r_v为水汽

蒸发时的阻力。

(5) 生物与其环境的热平衡：

生物与其环境的热平衡方程：

$$M + R_{吸收} = R_{散失} + H_C \pm H_K + \lambda E$$

式中，M 为代谢产生的热；$R_{吸收}$ 为吸收的辐射热；$R_{散失}$ 为发射的辐射热；H_C 为对流失热；H_K 为传导传热；λE 为潜热损失。

种群分布界线的隶属度函数

毕伯钧：辽宁省羊的种群分布与气候生态环境的关系．生态学杂志，1987，6(4)

$$\tilde{A}_i(x_i) = \begin{cases} 1 & (x_i > a) \\ 1 - \dfrac{a - x_i}{a - b} & (a > x_i > b) \\ 0 & (x_i < b) \end{cases}$$

式中，$\tilde{A}_i(x_i)$ 为绵羊、山羊种群分布界线的隶属度，a 与 b 为由绵羊、山羊过渡的综合气候指标共同确定的值，如 a 与 b 可为相应的生长季干燥度和降水量。

生物热环境的综合表示法

陆健健：能量生态学(三)：生物热环境的综合表示法．生态学杂志，1987，6(4)

(1) 热阻 $r_{总}$ 模型：

$$r_{总} = r_{Hb} + r_e + r_v$$

式中，r_{Hb} 为生物体热阻；r_e 为生物皮肤外覆盖物热阻；r_v 为潜热散失的热阻。

(2) 热平衡方程：

$$Q_a - \varepsilon\sigma T^4 + M = \lambda E - P_{cp}(T_b - T_a)/r_{Ha} + r_{Hb}(m - \lambda E)/r_e = 0$$

式中，Q_a 为生物吸收的总辐射；M 为生物单位面积的代谢产热量；λ 为蒸发潜热；E 为单位时间内所失去的水重量；r_{Hb} 为身体热阻；r_e 为当量热阻；r_{Ha} 为对流热阻；P_{cp} 为热阻与热传导率之积；T 为温度。

(3) 有效作用温度 T_e 模型：

$$T_e = T_a + (r_e/P_{cp})(Q_a - \varepsilon\sigma T_a^4)$$

式中，T_a 为其温；r_e 为当量热阻。

浮游植物初级产量的测定模型

郁俊尧，袁从伟：测定浮游植物初级产量的计算方法．生态学杂志，1987，6(5)

(1) 水下某一深处的辐射强度 I_D 模型：

$$I_D = I_0 e^{-KD}$$

式中，I_0 为水表面的辐射强度；D 为水面下的深度；K 为消光系数。

(2) 某一光强下的光合速率 P_D 模型：

$$P_D = \frac{ABI_D}{A + BI_D}$$

式中，I_D 为光强；A 和 B 为常数。

土壤微生物能量流动的稳定性分析模型

杨靖春，祖元刚，倪平等：东北羊草草原微生物在能流中作用的研究——常微分方程稳定性在能流上的应用．生态学报，1988，8(3)

(1) 土壤微生物能量流动的数学模型：

$$\begin{cases} \dfrac{dx(t)}{dt} = FX(t) + GU(t) \\ Y(t) = HX(t) \end{cases}$$

式中，$U(t) = \begin{bmatrix} U_1(t) \\ U_2(t) \end{bmatrix}$ 为输入向量；$X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$ 为状态向量；$Y(t) = X(t)$ 为输出向量；$F = \begin{bmatrix} -2.47 & 0 \\ 1 & -1.33 \end{bmatrix}$ 为系数矩阵；$G = H = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为单位矩阵。

(2) 土壤微生物能量流动的平衡态模型：

$$Xe = -206.57\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_1\lambda_2}\right)$$

式中，$\lambda_1 = -2.47$；$\lambda_2 = -1.33$。

农田蒸腾估算模型及其边界层阻力模型

卢振民：农田蒸散计算中边界层阻力的确定．生态学杂志，1988，7(4)

(1) 水汽传输的边界层阻力 r_a 模型：

$$r_a = r_{am} + r_b$$

$$r_{am} = \left(\ln\frac{z - d}{z_0} + \Phi_m\right)^2 \Big/ \left(k^2 u_z\right)$$

$$\Phi_m = \int_{d+Z_0}^{Z} [(\varphi_m - 1)/Z] dZ$$

$$r_b = 常数 \times u_*^{-\frac{2}{3}}$$

式中，k 为卡曼常数；d 为零平面位移高度；φ_m 为空气稳定度的函数；u_Z 为高度 Z 处的风速；Z_0 为蒸散面粗糙度。u_* 为表面摩擦速度。

(2) 蒸腾的估算模型：

$$LT = \frac{\Delta A' + C_p \rho D / r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_{ST}/r_a)}$$

式中，A' 为冠层所接受的净辐射能；D 为空气饱和差；r_{ST} 为冠层总气孔阻力；L、Δ 分别为汽化潜热和饱和水汽压随温度变化的斜率；ρ、C_p 分别为干空气的密度和比热；γ 为干湿球常数。

反射率气候模拟模型

欧阳首承，张建国，温丽叶：生态平衡分析方法的探讨——反射率气候模拟尝试. 生态学杂志，1989，8(2)

(1) 空气相对湿度模型：

$$f = -88.80 \ln \frac{1+A}{1-A} + 113.86$$

(2) 降水量模型：

$$R = 4\left(-348.44 \ln \frac{1+A}{1-A} + 392.61\right)$$

式中，A 为反射率。

针毛草原放牧衰退演替阶段的模糊据类分析模型

李晓军，赵松岭，张鹏云等：针毛草原放牧衰退演替阶段的模糊聚类分析. 生态学报，1989，9(2)

(1) ISODATA 模糊分类模型：

$$J_m(R,V) = \sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c} r_{ik}{}^m \|u_k - V_i\|^2$$

式中，V_i 为第 i 类的聚类中心；$\|u_k - V_i\|^2$ 为样本 u_k 与 V_i 的距离平方；c 为分类之组数；R 为预分类矩阵；m 为参数；V 为聚类中心。

(2) 系统模糊聚类分析：

模糊相似矩阵模型：

$$R = [r_{ij}]$$

式中，$r_{ij} = \begin{cases} 1 & (i = j) \\ \dfrac{(u_i, u_j)}{\|u_i\| \cdot \|u_j\|} & (i \neq j) \end{cases}$；$(u_i, u_j) = \sum_{k=1}^{n} u_i^k u_j^k$；$\|u_i\|^2 = (u_i, u_i)$。

生态环境脆弱带的判定模型

牛文元：生态环境脆弱带 ECOTONE 的基础判定. 生态学报，1989，9(2)

1. 生态环境脆弱带的函数表达

(1) 生态环境脆弱带的宽度指标模型：

$$B = [x_1 + 3(\sigma_1 + \sigma_2)] - x_2$$

式中，B 为事实上的重叠带宽度，代表着空间交错带的规模。

(2) f_1 与 f_2 的重叠度 $W(\%)$，即生态环境脆弱带中对于两类生态特征过渡的重叠度：

占据生态系统 f_1 的空间比例：

$$W(f_1) = \frac{\int_{x_0}^{3\sigma_1} N_1(x_1,\sigma_1)dx_1 + \int_{x_0}^{-3\sigma_2} N_2(x_2,\sigma_2)dx_2}{\int_{-3\sigma_1}^{3\sigma_1} N_1(x_1,\sigma_1)dx_1}$$

占据生态系统 f_2 的空间比例：

$$W(f_2) = \frac{\int_{x_0}^{3\sigma_1} N_1(x_1,\sigma_1)dx_1 + \int_{x_0}^{-3\sigma_2} N_2(x_2,\sigma_2)dx_2}{\int_{-3\sigma_2}^{3\sigma_2} N_2(x_2,\sigma_2)dx_2}$$

占据两个生态系统之和的空间比例：

$$W(f_1, f_2) = \frac{\int_{x_0}^{3\sigma_1} N_1(x_1,\sigma_1)dx_1 + \int_{x_0}^{3\sigma_2} N_2(x_2,\sigma_2)dx_2}{\int_{-3\sigma_1}^{3\sigma_1} N_1(x_1,\sigma_1)dx_1 + \int_{-3\sigma_2}^{3\sigma_2} N_2(x_2,\sigma_2)dx_2}$$

上述公式中的符号，与正态分布函数相同，为有 x_0 为 f_1 与 f_2 交点的横坐标投影位置。

2. ECOTONE 的脆弱度指标 F

(1) 脆弱度指标 F_1：

$$F_1 = \frac{R - E[R]}{\max[R] - E[R]}$$

式中，R 为实际观测 $A \cap B \cap C$ 的面积；$E[R]$ 为采用概率所计算的"期望面积"；$\max[R]$ 为最大可观测到的"重叠面积"，即最大的 $A \cap B \cap C$。

(2) 脆弱度指标 F_2：

$$F_2 = \frac{N \ln N - \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{t} a_{ij} \ln a_{ij} - \sum_{i=1}^{s} n_i \ln n_i - \sum_{j=1}^{t} m_j \ln m_j}{N \ln N - \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{t} a_{ij} \ln a_{ij}}$$

式中，$N = \sum_{i=1}^{s} n_i = \sum_{j=1}^{t} m_j = \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{t} a_{ij}$；对 f_1 而言，典型指标优先排序可能有 S 个分类（E_1 分类），其中每一类

别所具有的样方数目分别为$n_1,n_2,\cdots,n_s$；对f_2而言，典型指标优先排序可能有t个分类(E_2分类)，其中每一类别所具有的样方数目分别为$m_1,m_2,\cdots,m_t$，a_{ij}为$S\times t$矩阵中的元素，同时反应两类生态系统的综合因素。

3. ECOTONE脆弱度的进一步表达

动态的脆弱度指标模型：

$$D(F)=F_i\left(1+\frac{d_{t+1}}{d_{t-1}+d_t}\right)$$

式中，F_i为前述的脆弱度指标；d为ECOTONE交界带边缘的绝对移动距离。

土壤微生物呼吸速率的季节变化与土壤温度、土壤水分的关系模型

杨靖春，倪平，祖元刚等：东北羊草草原土壤微生物呼吸速率的研究．生态学报，1989，9(2)

(1) 土壤微生物呼吸速率的季节变化与土壤温度季节变化之间的一元回归方程：

$$F(x_1)=28.140\,58+1.604\,74x_1$$

(2) 土壤微生物呼吸速率的季节变化与土壤水分季节变化之间的一元回归方程：

$$F(x_2)=14.164\,723+2.990\ 113x_2$$

(3) 土壤温度、土壤水分的综合作用下对土壤微生物呼吸速率的季节变化的影响模型：

$$F(x_1,x_2)=3.834\,546+3.023\,687x_1-6.881\,99E-0.2x_1^2+2.025\,782x_2-0.031\,3081x_2^2$$

(4) 土壤微生物在时间t的呼吸速率模型：

$$\varphi(x_1,x_2)-\frac{dF}{dt}=\frac{\partial F}{\partial x_1}\frac{dx_1}{dt}+\frac{\partial F}{\partial x_2}\frac{dx_2}{dt}$$

上述各式中，x_1,x_2分别为土壤温度和土壤水分；$F=F[x_1(t),x_2(t)]$。

直射光通量 $S_{\alpha\beta}$

朱劲伟，金铭德：论乌兰敖都地区沙丘坡面直射光的分布．生态学杂志，1989，8(4)

$$S_{\alpha\beta}=I_0(u\sin\delta+v\cos\delta\cos\omega-\sin\beta\sin\alpha\cos\delta\sin\omega)$$

$$u=\sin\varphi\cos\alpha-\cos\varphi\sin\alpha\cos\beta$$

$$v=\cos\alpha\cos\varphi+\sin\varphi\sin\alpha\cos\beta$$

式中，$S_{\alpha\beta}$为坡度为α、坡向为β坡面上直射光到达量(通量)；φ为地理纬度；ω为时角；δ为太阳赤纬；I_0为直射光强度。

聚集分析模型

王建中：秋汛带鱼对水团舌锋的聚集反应与渔场预报初探．生态学报，1989，9(4)

(1) 扩散指数模型：

$$I_\delta=\frac{n\sum_{i=1}^{n}x_i(x_i-1)}{\left(\sum_{i=1}^{n}x_i\right)^2-\sum_{i=1}^{n}x_i}$$

式中，n为样本总数。

(2) 平均拥挤度模型：

$$M^*=\frac{\sum_{j=1}^{n}x_{ij}^2}{\sum_{j=1}^{n}x_{ij}}-1$$

式中，n为样本指数。

Morisita 指数 I_δ

刘建军：用底栖动物评价水磨河的污染程度——兼论Morisita指数的污染指示意义．生态学杂志，1989，8(5)

$$I_\delta=N\left[\sum_{i=1}^{N}n_i(n_i-1)\Big/x(x-1)\right]$$

式中，N为样品总数；n_i为第i个样品中动物的数量；x为总样品中动物数量的总和。

局部派生方程的双生系统模型

Caussade B, Prat M：分水岭中的运移模型．Ecological Modelling, 1990, 52

$$\frac{\partial\omega}{\partial t}=\nabla\cdot(D_\omega\nabla\omega+D_T\nabla T)-\nabla\cdot\left(\frac{\rho_e}{\rho}K\nabla z\right)$$

$$(\rho C)^*\frac{\partial T}{\partial t}=\nabla\cdot(\lambda^*+L_v\rho D_{vT}\nabla T)+\nabla\cdot(L_v\rho D_v\nabla\omega)$$

式中，D_ω是物质的等温扩散系数；D_T是物质的非等温扩散系数；D_v是在水蒸气阶段，物质的等温扩散系数；D_{vT}是在水蒸气阶段，物质的非等温扩散系数；K是水分传导性；L_v是水蒸气的潜热；T是温度；t是时间；λ^*是表层导热性；ω是含水量；$(\rho C)^*$是多孔渗水环境的等价热容量；ρ_e是水密度；ρ是干物质的密度。

汾河水库输沙量的灰色关联分析模型

樊兰英：生态环境与汾河水库输沙量的灰色关联分析和预测．生态学杂志,1990，9(1)

(1) 关系系数 $\xi_{ij}(t)$ 模型：

$$\xi_{ij}(t)=\frac{\Delta_{\min}+k\Delta_{\max}}{\Delta_{ij}(t)+k\Delta_{\max}}$$

$$t\in\{1,2,\cdots,N\}$$

$$\Delta_{ij}(t)=\left|x_i(t)-x_j(t)\right|$$

$$\Delta_{\min}=\min_t\left|x_i(t)-x_j(t)\right|$$

$$\Delta_{\max}=\max_t\left|x_i(t)-x_j(t)\right|$$

式中，x_i 为 t 时刻输沙量的时间序列；x_j 为 t 时刻各因素的时间序列；k 为系数。

(2) 关联度 r_{ij} 模型：

$$r_{ij}=\frac{s_{ij}}{s_{ii}}$$

式中，s_{ii} 为 ξ_{ii} 与坐标围成的面积；s_{ij} 为 ξ_{ij} 与坐标围城的面积。

峨眉山金顶冷杉死亡与化藏寺火灾关系模型

刘祖祉：峨眉山金顶冷杉死亡与化藏寺火灾关系的探讨．生态学杂志,1990，9(1)

(1) 辐射热强度 q 模型：

$$q=\frac{\varepsilon Q}{4\pi x^2}$$

式中，Q 为单位时间释放的总热量；x 为火焰中心距防护对象的距离；ε 为辐射率。

(2) 距火场中心不同距离冷杉木的升温 t 模型：

$$t=\Delta t+t_E$$

$$\Delta t=\frac{q'-mr\phi}{cm}$$

$$q'=q(1-0.4)$$

式中，q' 为受热体吸收的辐射热能；c 为受热体的比热；ϕ 为枝叶中水分蒸发量比率；r 为水汽化热；m 为冷杉单位面积重量；t_E 为树木温度。

阔叶树叶面积的通用测算模型

马良清：一类阔叶树叶面积的通用公式测算法．生态学杂志,1990，9(1)

(1) 一片叶的面积 A_l 模型：

$$A_l=2\int_0^l\frac{2d}{l}y\left(1-\frac{y}{l}\right)dy=\frac{2}{3}dl$$

式中，d 为叶宽；l 为叶长。

(2) n 片叶组成的样本总体面积 $\sum_{i=1}^{n}A_{l_i}$ 模型：

$$\sum_{i=1}^{n}A_{l_i}=\frac{2}{3}\sum_{i=1}^{n}d_il_i$$

式中，A_{l_i}，d_i 和 l_i 分别为第 i 片叶的面积、宽度和长度。

人口密度与生物资源的关系模型

王振堂，盛连喜：图们江流域人口变化对森林生态资源的影响．自然资源学报，1990，5(2)

(1) 依据近百年以来文献所载的人口数据，得到人口密度 ρ 对时间 t 的函数，可以表示为：

$$\rho=ae^{bt}$$

式中，$a=0.9387$；$b=0.035\,694$；$t=i-1860$；i 为公元纪年；$t>0$ 时，人口密度随时间不断增大。

(2) 原始森林植被的面积与人口密度之间的关系，具有如下形式：

$$s(\rho)=ae^{-b\rho-c/\rho}\quad(\rho\geqslant 1)$$

式中，$s(\rho)$ 为原始森林植被面积；ρ 为人口密度，详见(1)中的方程式；$a=1.8023$；$b=0.023$；$c=0.0289$。

(3) 珍惜贵重生物资源：紫貂与人口密度之间的关系模型：

$$\frac{dx}{dt}=(r-b_0x)x-c\rho(t)\cdots$$

当流域人口密度 $\rho(t)=0$ 时，对方程求解，有：

$$\int dx=\int(r-b_0x)xdt$$

$$x=\frac{K}{1+e^{-r(t_0-t)}}$$

$$K=K(S,Q)=K(S)-Q\text{（环境容量）}$$

$$K(S)=K_0S(\rho)$$

$$Q=Q(\rho,t)=A\exp\frac{-\rho}{4\Pi K_0}\cos\cdot\frac{h\Pi|t|}{K_0}\cdots$$

$$S(\rho) = 1.8023e^{-0.023\rho \quad 0.0289/\rho}\cdots$$

$$x = \frac{K_0 S(\rho) - Q(\rho,t)}{1 + e^{-r(t_0 - t)}}\cdots$$

式中，x 为紫貂种群总数量；t 为时间，b_0 为紫貂制约参数；t_i 为大于 1880 的公元纪年；c_0 为人对紫貂制约参数；r 为紫貂种群纯增殖率；K_0 为流域内紫貂最大容量；$Q(\rho,t)$ 为紫貂年度被捕杀量；A，h 都为常数，$A = 3501$，$h = 0.8182$。

方程中各参数及参量的注释：K_0 为环境最大容量，目前流域内已难找到紫貂正常繁殖的地带，K_0 的确定是比较困难的。但是与该流域相毗邻的长白山自然保护区内的紫貂由于受到严格的保护，其生存密度可以用来估测图们江流域紫貂的最大容量。$K(S) = K_0 \cdot S(\rho)$，$S(\rho)$ 是红松原始林的面积，也是紫貂的生存环境，它与人口密度有着负指数关系。

产量与密度之间的关系模型

刘德立，Johnson I R，Lovett J V：一个描述多种产量-密度关系的经验模型．生态学报，1990，10(3)

(1) 单株产量 w 模型：

$$w = \begin{cases} w_m & (\rho < \rho^*) \\ w_m \dfrac{K^a + \rho^{*a}}{K^a + \rho^a} & (\rho \geqslant \rho^*) \end{cases}$$

(2) 单位面积产量与密度的关系模型：

$$Y = \begin{cases} w_m\rho & (\rho < \rho^*) \\ w_m\rho \dfrac{K^a + \rho^{*a}}{K^a + \rho^a} & (\rho \geqslant \rho^*) \end{cases}$$

式中，ρ 和 ρ^* 分别为密度和发生种内干扰的临界密度；w_m 为 $\rho \leqslant \rho^*$ 时的单株产量，等于一恒定常量；K 和 α 为待定参数；ρ^* 为预先给定值。

共生生物的环境保护模型

Fisher M E, Freedman H I：共生生物的环境保护模型．Ecological Modelling, 1991,58

模型方程：

把生物的共生模型表示成三个普通的微分方程。$u(t)$ 表示在已知时间 t 的保护者共生生物的种群密度；$x(t)$ 表示 u 的兼性互利共生；$K(t)$ 是 x 的承载力：

$$\dot{u} = uf(u) + ux\alpha(u,x)\phi[H(x-\bar{x})H(u-\bar{u})\beta(u,t)]$$

$$\dot{x} = xg(x,K)$$

$$\dot{K} = Kh(K) + H(x-\bar{x})H(u-\bar{u})\beta(u,t)$$

初始条件：

$$u(0) = u_0 \geqslant 0$$

$$x(0) = x_0 \geqslant 0$$

$$K(0) = K_0 \geqslant 0$$

式中，$H(z) = \begin{cases} 0 & (z<0) \\ 1 & (z>0) \end{cases}$，为 Heaviside 阶梯函数；$\bar{u}$ 是一个边界值，如果低于这个值，保护者共生生物没有足够的资源来保护其他的共生生物的环境；$\bar{x}$ 是一个边界值，如果低于这个值，对 u 来说不值得保护环境；$H(x-\bar{x})H(u-\bar{u})\beta(u,t)$ 表示保护者共生生物 u 对 x 的环境的正面影响；$ux\alpha(u,x)$ 是 x 对 u 的正面影响的量度；$\beta(u,t)$ 表示一旦 x 和 u 种群达到它们的临界水平时，u 对 x 的环境的正面影响。

群体潜在蒸腾量 T_p

高旺盛，胡恒觉：黄土丘陵半干旱区不同作物生态效能研究．生态学杂志，1991，10(2)

$$T_p = \sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i}{600/J_i} D_i$$

式中，Q_i 为第 i 生长阶段内的太阳辐射量；J_i 为第 i 生长阶段群体太阳能吸收量与叶面积指数的比例关系值，D_i 为第 i 生长阶段的生长天数。

SPAC 水热动态模拟模型

康绍忠：土壤-植物-大气连续体水热动态模拟的研究．生态学报，1991，11(2)

(1) 地上植物冠层的能量平衡模型：

$$R_{no}(1 - e^{-KI_{la}}) - I_{la}\rho C_p(T_l - T_a)/r_{al} -$$

$$I_{la}\frac{\rho C_p}{\gamma}\left[(e_s - e_a) + \Delta(T_l - T_a)\right]/(r_{st} + r_{al}) = 0$$

式中，R_{no} 为冠层上方总净辐射；I_{la} 为叶面积指数；K 为冠层消光系数；ρ 为空气密度；C_p 为空气定压比热；T_l 和 T_a 分别为叶温和气温；e_s 和 e_a 分别为空气饱和水汽压和实际水汽压；γ 为湿度计常数；Δ 为饱和水汽压-温度曲线上的长书斜率；r_{st} 为叶气孔阻力；r_{al} 为冠层周围空气的水汽扩散阻力。

(2) 地下土壤部分的能量平衡模型：

$$R_{no}e^{-KI_{la}} - \rho C_p(T_s - T_a)/r_{as} - \overline{\lambda_l}(T_s' - T_l) -$$

$$\frac{\rho C_p}{\gamma}\left[\frac{RT_s}{1000} \cdot e^{(\psi_m g/RT_s - 49759)/T_s + 6.0035} - e_a\right] /$$

$$(r_{as} + r_{sv}) = 0$$

式中，r_{as} 为土壤表面与空气间的水汽扩散阻力；r_s 为由于土壤表面干燥下层水汽扩散通过表层的阻力；ψ_m 为地表 0~0.5m 的土壤基模势；g 为重力加速度；R 为气体常数；T_s 为地表温度；$\overline{\lambda_1}$ 为 1m 土层中的平均导热率；T_1 为 1m 深处的土壤温度。

(3) SPAC 的水分通量模型：

1）从根木质部到叶片蒸腾面的水流通量模型：

$$CT=(\psi_s-\psi_1)/(R_s+R_p)$$

式中，ψ_s 和 ψ_1 分别为土水势和叶水势；R_s 和 R_p 分别为水从土壤流到根表面的阻力和水流通过植株体的阻力。

2）从蒸腾面到大气的水流通量模型：

$$CT=[A(1-e^{-KI_{la}})R_{no}-\rho C_p(e_s-e_a)/r_{al}]/\lambda[A+\gamma(1+r_{st}/r_{al})]$$

式中，λ 为汽化潜热。

油松毛虫优化管理决策模型

夏乃斌，屠泉洪，宋长义等：油松毛虫优化管理的研究．生态学报，1991，11(3)

(1) 害虫种群动态模型：

$$N(k+1)=N(k)a(k)[F(k)+F_0]\sum_{i=1}^{N}b_i(k)u_i(k)$$

式中，$N(k)$ 为 k 阶段的害虫种群密度；$a(k)$ 为 k 阶段害虫的自然存活率；$F(k)$ 为 k 阶段害虫得生殖力；$F_0=\begin{cases}0 & (F(k)\neq 0)\\ 1 & (F(k)=0)\end{cases}$；$b_i(k)$ 为第 i 种措施对害虫的存活率。

(2) 各防治措施所挽回的损失模型：

$$y(u_i)=\left[2.6584E-5+3.2048E-6\frac{100WR_iN}{W(D,L)}\right]S$$

式中，N 为油松毛虫幼虫密度；W 为油松针叶重；R_i 为第 i 种措施防治效果；S 为油松密度。

枯枝落叶与分解者之间能量流动模型

郝继勋，祝廷成：羊草草地枯枝落叶与分解者之间能量流动的研究．植物生态学与地植物学学报，1992，16(2)

$$\frac{dx_1(t)}{dt}=-k_1x_1(t)+U(t)$$

$$\frac{dx_2(t)}{dt}=k_1x_1(t)-k_2x_2(t)$$

式中，$x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 分别为储存在枯枝落叶和分解者中的能量；k_1 为枯枝落叶转移到分解者的能量速率；k_2 为分解者因呼吸作用的能量消耗速率；$U(t)$ 为输入变量。

净第一性生产力 P_r

邢福，祝廷成：内蒙古东部线叶菊草地生物量与净第一性生产力的初步研究．植物生态学与地植物学学报，1992，16(2)

$$P_n=b_n+\sum_{i=1}^{n}a_i+\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{a_i}{2}\gamma_it_i\right)$$

式中，b_n 为生长末期生物量；a_i 为 t_i 期间结束时凋落物的现存量；γ_i 为凋落物消失率。

泥炭样本中的气体流通率

Hogg E H, Lieffers V J, Wein R W：泥炭剖面中潜在的碳流失－温度、干旱周期和火灾的影响．Ecological Applications, 1992, 2(3)

$$R=(DV/t)[(C-C_a)/M]$$

式中，D 是在周围环境的温度、压力和湿度条件下，纯净气体(例如 CO_2 或 CH_4)的密度(mg·ml^{-1})；V 是有效质部空间的容积；t 是时间间隔；C 是最终的气体摩尔浓度；C_a 是最初的气体摩尔浓度；M 是泥炭样本的干量。

侧柏、油松混交林混交效益模型

乔鑫山，李明川，杨明华：山东鲁山侧柏、油松混交林混交效益的初步研究．生态学报，1992，12(3)

$$I_c=E\Big/\sum_{i=1}^{8}E$$

式中，$E=F_1/F_2-1$，F_1 和 F_2 分别为混交林值和侧柏纯林的值。

柑橘产量结构生态环境模式

汪铎，叶英德：柑橘增减产量生态环境模式研究．生态学报，1992，12(3)

(1) 柑橘产量构成效应模型：

$$Y_i=a_i+\sum_{j=1}^{n}A_jX_j$$

式中，Y_i 为各关键时期生态因子对产量构成产生的效应；a_i 为描述柑橘在各个关键时期的生理特性的常数；A_j 为生态因子的待定系数；X_j 为影响柑橘产量的主要生态因子；j 为因子序。

(2) 单株产量增减生态模型：

$$\hat{Y} = C_0 - C_1\hat{Q} + C_2\hat{W}$$

式中，$\hat{Y}$ 为单株产量模拟值；C_0 为待定常数；$\hat{Q} = 100 - \hat{P}$，即着果率；$\hat{W}$ 为单果重模拟值；C_1 和 C_2 均为待定系数

海洋浮游植物量模型

姚晓阳，朱明远，吴宝铃：一些海洋浮游植物量子产值的研究，生态学报，1993，13(1)

(1) 叶绿素 a 吸光系数 $\overline{K}_c$ 模型：

$$\overline{K}_c = \frac{\int_{400}^{700} K_c(\lambda)i(\lambda)d\lambda}{\int_{400}^{700} i(\lambda)d\lambda}$$

式中，$i(\lambda)$ 为特定的光辐射；K_c 为浮游植物吸光系数。

(2) 光合利用光 R_{puabs} 模型：

$$R_{puabs} = R_{paabs}\frac{CK_c}{K}$$

式中，R_{paabs} 为水体吸收的光合可用光；C 为叶绿素 a 浓度；K 为海水的总吸收光系数。

(3) 量子产值 ϕ_z 模型：

$$\phi_z = \frac{R_{ps}}{R_{puabs}}$$

式中，R_{ps} 为光合储存光能。

(4) 光利用效率模型：

$$E = \frac{C\overline{K}_c}{K}E_c$$

式中，E_c 为能量转换效率。

^{14}C 法测定的底栖植物光合作用速率 P

毛兴华，朱明远，杨小龙：桑沟湾大型底栖植物的光合作用和生产力的初步研究，生态学报，1993，13(1)

$$P = \frac{1.05(R_L - R_D)W_c}{RTW_s}$$

式中，R_L、R_D 分别为白瓶中和黑瓶中底栖植物的放射性强度；W_c 为实验海水中总 CO_2 重量；R 为加入 ^{14}C 的总强度；T 为培养时间；W_s 为样品干重。

BACI 取样方案的两种分析模型

Schroeter S C, Dixon J D, Kastendiek J et al：监测环境冲击带来的生态影响：海藻林的无脊椎动物的案例研究，Ecological Applications, 1993, 3(2)

$$X_{ijk} = mS_{i(j)}P_jL_kE\varepsilon_{ijk}$$

式中，X_{ijk} 是在第 i 次调查、第 j 次操作期、第 k 个区域中得到的丰度值；m 是在事前期内受控站点的平均值；$S_{i(j)}$ 是在第 i 次调查、第 j 次操作期的影响；L_k 是地点的影响；$L_1 = 0$（控制）；$L_2 = I$（影响）；P_j 是操作期的影响，$P_1 = 0$（事前期），$P_2 = A$（事后期）；E 是环境冲击对生态的影响，在事后期的受冲击地点 $E = e$，否则 $E = 0$；ε_{ijk} 是误差。

$$d_{ijk} = m + P_i + L_j + PL_{ij} + S_{k(i)} + \varepsilon_{ijk}$$

式中，d_{ijk} 是在一个已知日期，长短期影响和控制值之间的差异；m 是在丰度上的根本平均差异；P_i 是第 i 时期的影响；L_j 是第 j 个地点的影响；PL_{ij} 是时期与地点的相互作用；$S_{k(i)}$ 是第 i 时期内，第 k 次调查的影响；ε_{ijk} 是误差。

相对电导率

戴倩，骆世明：广东省主要引进牧草品种的温度适应性研究，生态学杂志，1993，12(2)

$$\text{相对导电率}(\%) = \frac{\text{处理电导率} - \text{对照电导率}}{\text{最大电导率}} \times 100\%$$

水稻-二化螟系统模型

陈斌，吴蔚文，蒋书楠：水稻-二化螟系统模型研究，生态学报，1993，13(2)

(1) 产量预测模型：

$$Y_y = 0.853 - 6.77x_1 - 4.47x_3 - 13.15x_4 + 5.92x_1x_3 - 11.36x_2x_4 - 5.85x_1^2 - 3.76x_3^2 - 4.29x_4^2 \pm 0.005$$

(2) 虫口对产量的损失模型：

$$Y_L = -13.15x_4 - 11.36x_2x_4 - 4.29x_4^2$$

水流阻力模型

康绍忠：土壤-植物-大气连续体水流阻力分布规律的研究，生态学报，1993，13(2)

(1) 土壤阻力 R_s 模型：

$$R_s = 125(\Psi_m/\psi_{mo})^{2.57}$$

式中，Ψ_m 为土壤基质势；Ψ_{m0} 为土壤水分特征曲线上饱和点的进气值。

(2) 植物体的阻力 R_p 模型：

$$R_p = \frac{\Psi_s - \Psi_L}{T} - R_s$$

式中，T 为植物叶片的蒸腾速率；Ψ_s、Ψ_L 分别为土水势和叶水势。

(3) 叶-气系统的水流阻力 R_{La} 模型：

$$R_{La} = \frac{\Psi_L - \Psi_a}{T}$$

式中，Ψ_a 为大气水势。

主要生态因子对分解的效应模型

郭继勋，祝廷成：羊草草原枯枝落叶分解的研究——枯枝落叶分解与生态环境的关系．生态学报，1993，13(3)

(1) 地表温度(T)对分解效应的模型：

$$Y = 0.212\,946\mathrm{e}^{0.092\,807T}$$

式中，Y 为分解速率。

(2) 土壤水分对分解效应的模型：

$$Y = 0.036\,701\mathrm{e}^{0.120\,972W}$$

式中，W 为土壤含水量。

(3) 土壤 pH 对分解效应模型：

$$Y = \mathrm{e}^{5.204\,66p - 42.548\,78}$$

式中，p 为土壤 pH。

(4) 相对湿度(M)对分解效应模型：

$$Y = 0.10291M - 5.14121$$

热度 (r_{ah})和蒸汽 (r_{av})的空气动力学阻力模型

Owensby C E, Coyne P I, Ham J M et al：在高草草原生态系统中，生物数量的再生产暴露于周围环境并且提高 CO_2 的含量．Eological Applications, 1993,3(4)

$$r_{av} \cong 283\beta\sqrt{\frac{d}{u}}$$

$$r_{ah} \cong 307\beta\sqrt{\frac{d}{u}}$$

式中，d 是以米为单位的典型叶片的参数；u 是以米为单位的每秒空气的流速；β 是一个可以大幅度变化的调整因子。

植物-土壤的均衡行为模型

Comins H N, McMurtrie R E：营养有限的森林对二氧化碳丰度的长期影响：植物-土壤模型的均衡行为．Ecological Applications, 1993, 3(4)

(1) 氮守恒：

$$N_A - N_F + N_R + N_D = N_E + N_B + N_W$$

式中，N_A 是大气沉积氮的数量；N_F 是被共生和非共生微生物固定下来的氮总量；N_R 是氮从被动池中释放的常数比率；N_D 是腐烂木头中氮的释放率；N_E 是氮的发散率(包括气态的发散和浸出)；N_B 是氮在被动池中的埋藏率；N_W 是植物茎中氮的储藏率。

(2) 生态平衡中，营养物循环和线性的土壤碳流动：

$$C_{ij} = J_{ij} + K_{ij}G$$

式中，C_{ij} 是从第 j 个到第 i 个土壤池的碳流动；J_{ij} 和 K_{ij} 是常数；G 是植物的碳生产。

(3) 氮的吸收 U 和植物生产 G 之间的关系是：

$$N_A + N_F + N_R = G\eta_w\nu_w + U\xi/(1-\xi) + \nu_p(\alpha C_R + \Omega G)$$

式中，η_w 是对植物茎来说碳的分割系数；ν_w 是植物茎中"氮:碳"的比率；ξ 是氮的发散部分；ν_p 是被动土壤池中"氮:碳"的比率；α 是从后来重新埋藏的被动池中释放出来的碳的平衡比例；C_R 是作为被动土壤原始物质的碳的埋藏平衡率；Ω 是最终埋藏在被动池中的植物的碳产品的平衡比例。

(4) 植物中的碳氮分配：

$$G = \frac{U_0}{\eta_w\nu_w + \Omega\nu_p - \xi(\eta_f\lambda_f\nu_f + \eta_r\lambda_r\rho\nu_r - \Omega\nu_p)}$$

式中，U_0 是输入到系统中的氮的净比率；η_f 是树叶中碳的分割系数；ν_f 是树叶中"氮:碳"的比率；λ_f 和 λ_r 是活着的树叶和树根中"氮:碳"的比率；η_r 是树根中碳的分割系数；ν_r 是树根中"氮:碳"的比率；ρ 是树根中氮碳比与树叶中"氮:碳"的比率。

(5) 光合作用能力：

$$G = \phi_0\varepsilon_0\omega R([CO_2])I(F)E(\nu_f)$$

式中，ϕ_0 是入射的光合活化作用(PAR)；ε_0 是在当前周围二氧化碳浓度下，潜在的 PAR 利用率；R 是与当前周围二氧化碳浓度相一致的一个因子；$I(F)$ 是光拦截因子；$E(\nu_f)$ 表示低氮浓度条件下，比率受限的

影响，假设 $E(v_f)=\begin{cases}1 & (v_f \geq v_0)\\ v_f/v_0 & (v_f < v_0)\end{cases}$，$v_0$ 是为避免光合作用的脱氮作用中氮的受限所需要的最小的氮浓度

(6) 生产力增加的状况：

$$dG/dv_f = -(G^2/U_0)[(1-\xi)v_p d\Omega/dv_f + \xi(\eta_f\lambda_f + \eta_r\lambda_r\rho)]$$

净生产量模型

肖瑜：对采用平均叶龄估算叶年净初级生产量的修正．植物生态学与地植物学学报，1993，17(4)

$$P_n = |l_n l_x| B/\bar{x}$$

式中，P_n 为一段时间内的净生产量；B 为生物量；$\bar{x}$ 为平均叶龄；l_x 为 $(x, x+dx)$ 龄级内的存留率，即该龄级 t 时刻生存叶片数量与初始叶片数量之比。

杨树护田林带疏透度模型

张纪林，吕祥生：杨树护田林带疏透度模型及应用．生态学杂志，1993，12(5)

(1) 林带疏透度 Y 全模型：

设：林龄(A)、株距(D_{BH})、行距(D_{BR})、密度(D_S)、树高(H)、胸径(D)、冠高(C_H)、冠幅体积(C_A)为自变量 X_j，$j=1,2,\cdots,p$。当数学模型建立的样本数 $n=31$ 时，则 $Y=(Y_1,Y_2,\cdots,Y_{31})^T$，式中，$Y_i$ 为第 i 个样本的林带疏透度；$X_{i1}, X_{i2},\cdots,X_{i8}$ 为初步入选的 8 个自变量在第 i 个样本中的各自变量的观测值。模型如下：

$$\begin{cases}Y = X\beta+\varepsilon\\ E(\varepsilon)=0\\ D_{(\varepsilon)}=\sigma^2 In\end{cases}$$

式中，X 为 $n\times p$ 阶矩阵，$n=31, P=8+1$；$\beta=(\beta_0,\beta_1,\cdots,\beta_p)^T$，$\beta$ 的最小二乘估计(LS 估计)为：

$$\begin{cases}\hat{\beta}=\left(X^TX\right)^{-1}X^TY\\ \hat{Y}=X\hat{\beta}=X\left(X^TX\right)^{-1}X^TY\end{cases}$$

(2) 衡量预测精度的复相关系数 R_p 模型：

$$R_p = \frac{\sigma_{\hat{Y}Y}}{\sigma_{\hat{Y}}\sigma_Y}$$

式中，$\sigma_{\hat{Y}}^2=\frac{1}{n}\hat{Y}^T\hat{Y}-\left(\bar{\hat{Y}}\right)^2$；$\sigma_Y^2=\frac{1}{n}Y^TY-\left(\bar{Y}\right)^2$；$\sigma_{\hat{Y}Y}^2=\frac{1}{n}\hat{Y}^TY-\bar{\hat{Y}}\bar{Y}$；$\bar{\hat{Y}}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\hat{Y}_i$；$\bar{Y}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}Y_i$。

(3) 各自变量对因变量的预测贡献大小 $\rho_{Y,U,1,\cdots,\mu-1,\mu+1,\cdots,p}$ 模型：

$$\rho_{Y,U,1,\cdots,\mu-1,\mu+1,\cdots,p}=\frac{-\gamma^{\mu,p+1}}{\left(\gamma^{\mu,\mu}\gamma^{p+1,p+1}\right)^{2}}$$

$$(\mu=1,\cdots,p+1)$$

式中，$\gamma^{\mu,\mu}$ 为相关矩阵 R 的逆矩阵 R^{-1} 的元素。

树木基本面积预报模型

Fralish J S：伊利诺斯州肖尼山地立地环境对森林生产力的影响．Ecological Applications, 1994, 4(1)

$$B_A=-12.0+7.70\ln E_{SD}-0.11S_{TON}+2.54T_{ASP}+0.053S_{LOPOS}$$

式中，E_{SD} 是有效土壤深度；S_{TON} 是剖面上石块的平均百分比体积；T_{ASP} 是转换面；S_{LOPOS} 是倾斜位置。

$$B_A=-5.44+8.38\ln P_{AWC}+0.074S_{LOPOS}+1.55T_{ASP}$$

式中，P_{AWC} 是整个土壤剖面的可用水数量。

预报 Q. alba I_s (生境指数)的模型：

$$I_s=4.61+2.74\ln P_{AWC}0.56S_{LOPOS}+1.29T_{ASP}$$

臭氧对春小麦生长影响的分析模型

安黎哲，王勋陵：臭氧对春小麦生长的影响及稀土的防护效应．生态学报，1994，14(1)

(1) 相对生长率 R_{gr} 模型：

$$R_{gr}=\int\frac{1}{W}\frac{dW}{dt}dt=\frac{\ln W_2-\ln W}{t_2-t_1}$$

(2) 净同化率 R_{na} 模型：

$$R_{na}=\int\frac{1}{A}\frac{dW}{dt}dt=\frac{(W_2-W_1)(\ln\bar{A}_2-\ln\bar{A}_1)}{(t_2-t_1)(\bar{A}_2-\bar{A}_1)}$$

(3) 叶面积比 R_{la} 模型：

$$R_{la}=\frac{\bar{A}_i}{W_i}$$

(4) 叶重比 R_{le} 模型：

$$R_{lc}=\frac{W_{li}}{W_i}$$

(5) 叶面积系数 S_{la} 模型：

$$S_{la}=\frac{\overline{A}_i}{LW_i}$$

式中，$\overline{A}_i$ 为 t_i 时刻整株植物的叶面积；$\overline{A}$ 为叶面积函数；W_{li} 为 t_i 时刻整株植物的叶干重；W_i 为 t_i 时刻整株植物干重；W 为整株植物干重的变化函数。

营养生态位模型

秦玉川，沈佐锐，黄可训等：山楂叶螨、苹果全爪螨及其捕食性天敌生态位的研究——营养生态位．生态学报，1994，14(1)

(1) 生态位面积模型：

$$S_i=\pi\left\|\sqrt{X_p^2(\alpha)\lambda_1}\ \ e_1\right\|\cdot\left\|\sqrt{X_p^2(\alpha)\lambda_2}\ \ e_2\right\|$$

(2) 生态位体积模型：

$$V_i=(4/3)\pi\left\|\sqrt{X_p^2(\alpha)\lambda_1}\ \ e_1\right\|\cdot\left\|\sqrt{X_p^2(\alpha)\lambda_2}\ \ e_2\right\|\cdot\left\|\sqrt{X_p^2(\alpha)\lambda_3}\ \ e_3\right\|$$

(3) 生态位重叠系数模型：

$$O.L'_{ij}=2\Delta_{ij}/\Delta_i+\Delta_j$$

式中，e_i 为对应 λ_i 的特征向量；λ_i 用来决定生态位空间各轴的长短；e_i 用来决定生态位空间在 PC 空间中的方向；Δ_i，Δ_j 和 Δ_{ij} 分别为椭圆 i（或椭球 i），椭圆 i（或椭球 j）的面积或体积及它们的相交面积(或相交体积)。

n 维生态位宽度 H_B 模型

余世孝，L．奥罗西：物种多维生态位宽度测度．生态学报，1994，14(1)

$$H_B=1-\frac{2I_{12}}{2I_{max}}$$

式中，

$$2I_{12}=2\sum_{j_1=1}^{m_1}\sum_{j_2=1}^{m_2}\cdots\sum_{j_n=1}^{m_n}\left[p_{j_1j_2\cdots j_n}\ln\frac{p_{j_1j_2\cdots j_n}}{(p_{j_1j_2\cdots j_n}+q_{j_1j_2\cdots j_n})/2}+q_{j_1j_2\cdots j_n}\ln\frac{q_{j_1j_2\cdots j_n}}{(p_{j_1j_2\cdots j_n}+q_{j_1j_2\cdots j_n})/2}\right],$$

m_i 为第 i 个生态位轴所划分的区间数；

$$2I_{max}=2\left\{p_{..}\ln\frac{p_{..}}{[p_{..}+q_{min}(ij)]/2}+q_{min}(ij)\ln\frac{q_{min}(ij)}{[p_{..}+q_{min}(ij)]/2}+q_{..}-q_{min}(ij)\ln 2\right\},\ q_{ij}\neq q_{min}(ij)$$

叶片面积指数 I_{la}

Runyon J, Waring R H, Goward S N et al：俄勒冈州横断面上对于主要净产品和光利用效率的环境限制．Ecological Applications, 1994, 4(2)

(1) 使用 L_I-C_{OR} I_{la}-2000 来估算叶片面积指数(I_{la})，这个方法权衡了间隙部分；$f(\theta)$ 为基于五个顶角(θ)散射蓝光的同时衰减的树冠、叶片面积指数(I_a)和叶片角度信息可以通过关系式转化获得，即：

$$f(\theta)=-\exp[-g(\theta)I_{fa}/\cos\theta]$$

式中，I_{fa} 是树叶面积指数；$g(\theta)$ 是树叶向角 θ 投影的部分。

(2) 基于针形叶的叶面积指数的估算公式：

$$I_{la}=I_{fa}R$$

式中，R 是在每个投影区域内，被测量的投影针形面积。

(3) I_{la} 可通过测量无云天气时记录下来的透射的 R_{pa} 来估算，表达式为：

$$I_{la}=-\ln(Q_t/Q_0)/k$$

式中，Q_t/Q_0 是树冠透射率；Q_t 是平均透射到树冠下的 R_{pa}；Q_0 平均射入的 R_{pa} 总量。

(4) 由于不合适的温度(T)、干旱(D)和水汽压力不足(D_{vp})、光利用率(ε_u)对生产的约束作用可以定量计算，即：

$$\varepsilon_u=f(T)f(D)f(D_{vp})R_{ipa}$$

式中，R_{ipa} 是被截取的光合作用的活跃辐射。

有蹄类动物草料计算模型

Turner M G, Wu Y, Wallace L L et al：模拟黄石国家公园北部地区有蹄类动物、植物和火灾之间在冬季的相互作用．Ecological Applications, 1994, 4(3)

(1) 每只有蹄类动物每天摄入的草料量：

$$I=\sum_{i,j}\left\{B_{fg}M_{bi}\min\left[F_{bsnow(i,j)},F_{bforage(i,j)}\right]\right\}$$

式中，B_{fg} 是每天最大草料速率；M_{bi} 是初始的有蹄类动物数量；$F_{bsnow(i,j)}$ 是对单元 i,j 雪深和雪密度的反

馈；$F_{bsnow(i,j)}$是对单元i,j可用生物量的反馈；i,j是每天调查的每个网格单元的位置。

(2) 修正后的雪中每天最大运动距离：

$$D=\frac{M_{dm}}{1+Y/100}$$

式中，M_{dm}是有蹄类的初始最大每天运动距离；Y是雪中运动能量消耗的相对增加量，其计算公式为$Y=[0.71+2.6(\rho-0.2)]D_{rs}e^{[0.0191+0.016(\rho-0.2)]D_{rs}}$，$\rho$是雪密度，$D_{rs}$是相对陷入深度。

城市绿化树木的降温增湿效应模型

杨士弘：城市绿化树木的降温增湿效应研究 地理研究，1994，13(4)

1.绿化树木的降温效应

(1) 蒸发潜热计算公式：

$$L=579-\frac{5}{9}T$$

式中，L为蒸发面的温度；579为时的蒸发潜热；T为温度

(2) 气温下降值计算公式：

$$\Delta T=\frac{Q}{\rho_c}$$

式中，ΔT为气温下降值；Q为绿地植物蒸腾使其周围单位体积空气损失的热量；ρ_c为空气的容积热容量

2.绿化树木的增湿效应

(1) 绝对湿度：

$$\Delta a=\frac{E_m}{1000}$$

式中，Δa为绝对湿度；E_m为绿地的蒸腾强度。

(2) 水汽压：

$$e=\frac{aT}{217}$$

式中，e为水汽压；T为绝对温度；a为绝对湿度。

(3) 相对湿度：

$$\Delta f=\frac{\Delta e}{e_s}\times 100\%$$

式中，Δf为相对湿度；e_s为饱和水汽压。

适宜绿洲面积计算模型

陈昌毓：祁连山区水资源及其对河西走廊生态环境的影响 自然资源学报，1995，10(2)

(1) 适宜绿洲面积模型：

以祁连山区各县市绿洲实际年水资源与其年生态需水量的供需差作为衡量各县市现有绿洲面积是否适宜的水分指标。设各县市现有绿洲面积为$S(10^4\text{hm}^{-2})$，其实际年水资源为H(mm)、年生态需水量为H'(mm)、水分年供需差为$\Delta H(H-H')$，则ΔH水层所确定的各县市需扩大或减少的绿洲面积$\Delta S(10^4\text{hm}^{-2})$，以及其实际年水资源确定的适宜绿洲面积$S'(10^4\text{hm}^{-2})$，可由以下两式计算：

$$\Delta S=\frac{\Delta H\cdot S}{H'}$$

$$S'=S+\Delta S$$

(2) 绿洲中适宜的农田面积的计算：

根据河西走廊绿洲的自然环境特点，我们用各县市适宜绿洲60%面积上的实际年水资源确定适宜农田面积S''，其计算式为：

$$S''=\frac{H'\cdot 60\%S'}{h}$$

式中，h为农田生态需水量(mm)。

浮游生物生物量指数

卢敬让，李德尚：浮游生物生物量指数作为水库营养状态和鱼产力评估指标的作用 生态学报，1995，15(2)

$$I_b^{(i)}=\frac{B_p(i)}{\overline{B}_p}+\frac{B_Z(i)}{\overline{B}_Z}$$

式中，$\overline{B}_p$和$\overline{B}_Z$分别为所统计样本(水域)浮游植物和浮游动物平均生物量；$B_p(i)$和$B_Z(i)$为第i样本的浮游植物和浮游动物生物量。

污染物质量平衡方程

叶常明，雷志芳，王宏等：单甲脒等有机污染物多介质环境的稳态平衡模型构建 生态学报，1995，15(2)

$$\sum_{i=1}^{N}V_i\frac{dC_i}{dt}=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}k_{ij}A_j(C_{ij}-C_i)+\sum_{i=1}^{N}V_iK_i\alpha_iC_i+\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}Q_{ji}C_j-\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}Q_{ij}C_i+\sum_{i=1}^{N}S_i$$

$$N=7,\ M=7,\ i\neq j,\ 当t=0时,\ C_i=C_i(0)$$

式中，C_i为单元i中的化学物浓度；S_i为单元i中污

染物源强；k_{ij} 为以单元 i 为基础、污染物在单元 i 与单元 j 之间质量交换的迁移系数；A_{ij} 为相应单元间交界面积；V_i 为单元 i 的体积；C_{ij} 为在与单元 j 处于平衡时，单元 i 中的污染物浓度；K_i 为单元 i 中发生反应的速率常数；α_i 为符号指示，当反应为降解时，$\alpha_i=1$，当反应生成污染物时，$\alpha_i=1$；Q_{ji}、Q_{ij} 为相应的对流体积流速。

作物田间耗水量模型

李锋瑞，赵松岭，李凤民等：陇东黄土旱塬作物组合系统农田耗水规律研究. 生态学报，1995，15(4)

(1) 农田水分平衡方程：

$$A_{et}=P-V-RO-\Delta W$$

式中，P 为生育期内大气降水量；V 为日降水量；O_r 为地表径流量；ΔW 为农田土壤储水变化量。

(2) 作物生育期内农田累积径流量 O_r 模型：

$$O_r=\sum_{i=1}^{n}\beta\left[P(D)-P_\lambda\right]i$$

式中，n 为生育期内日(或一次)降水量大于阈值(P_λ)的总天数(或总次数)。

logistic 曲线方程

袁玉欣，王颖，裴保华等：低温诱导对紫穗槐、刺槐抗旱性的影响. 植物生态学报，1996，20(1)

$$y=\frac{k}{1+ae^{-bt}}$$

式中，y 为 RI(相对电导率)或 MIP(细胞伤害率)；t 为温度梯度；k 为常数，为极限 RI 或极限 MIP；a 和 b 为待定系数。

生态位适宜度模型

欧阳志云，王如松，符贵南：生态位适宜度模型及其在土地利用适宜性评价中的应用. 生态学报，1996，16(2)

发展对资源环境的要求通常分为3类，第一类必须满足其最低要求，而且越丰富越好；第二类是在资源可供给的范围内存在一个适宜区间，资源过多或过少均将成为限制因素；第三类即现状值愈低愈好。它们的生态适宜模型分别为：

第一类：

$$X_i=\begin{cases}0 & (S_i<D_{i\min})\\ \dfrac{S_i}{D_{iopt}}R_i & (D_{i\min}<S_i<D_{iopt})\\ R_i & (S_i>D_{iopt})\end{cases}$$

第二类：

$$X_i=\begin{cases}0 & (S_i<D_{i\min}\text{或}S_i>D_{i\max})\\ \dfrac{S_i-D_{i\min}}{D_{iopt}-D_{i\min}}R_i & (D_{i\min}<S_i<D_{iopt})\\ \dfrac{D_{i\max}-S_i}{D_{i\max}-D_{iopt}}R_i & (D_{iopt}<S_i<D_{i\max})\end{cases}$$

第三类：

$$X_i=\begin{cases}1 & \\ \left(1-\dfrac{S_i-D_{i\max}}{D_{i\min}-D_{i\max}}\right)R_i & (D_{i\min}<S_i<D_{i\max})\\ 0 & (S_i>D_{i\min})\end{cases}$$

式中，X_i 为 i 种资源的生态位适宜度指数；S_i 为 i 资源现状的测度；D_i 为 i 资源要求测度；$D_{i\min}$、$D_{i\max}$ 和 D_{iopt} 分别为 i 资源要求的底限、上限和理想值；R_i 为 i 资源的风险性测定，常用保证率来测度。

生态势及场梯度模型

王德利，祝廷成：不同种群密度状态下羊草地上部生态场、生态势、场梯度及其季节性变化规律研究. 生态学报，1996，16(2)

(1) 羊草地上部生态场的生态势 $\Phi(r)$ 模型：

$$\Phi(r)=kf\exp(-gr^2)R/N$$

式中，r 为表示场源植物作用距离的向量；k 为模型系数；R 为场源植物的相对生长速率；N 为 r 处的资源利用效力；f 为冠的高度比；g 为 Gaussion 参数。

(2) 羊草地上部生态场的场梯度 ∇ 模型：

$$\nabla=\text{grad}\,\Phi(r)=2kgr\Phi(r)$$

生态环境脆弱性指标 F 的两种计算方法

王经民，王有科：黄土高原生态环境脆弱化计算方法探讨. 水土保持通报，1996，16(3)

(1) 集合论法：

$$F_1=\frac{R-E[R]}{\max[R]-E[R]}$$

式中，R 为实际观测 $A\cap B\cap C$ 的面积；$E[R]$ 为采用概率所计算的“期望面积”；$\max[R]$ 为最大 $A\cap B\cap C$ 的面积。

(2) “信息度量”法：

$$F_2=\frac{\hat{I}(E_1,E_2)}{I(E_1,E_2)}$$

式中，$\hat{I}(E_1,E_2)$ 为两个生态系统“自身信息量”与其“联合信息量”之差；$I(E_1,E_2)$ 为两个生态系统总体特征的“联合信息量”。

综合污染指数 I_{ip}

严昌荣，朱忠保：湖南省冷水江市锑矿山大气污染与马尾松衰亡．植物生态学报，1996，20(3)

$$I_{ip}=\sum_{i=1}^{n}W_iI_{p_i}$$

$$I_p=C_m/C_b$$

$$(i=1,2,\cdots,n)$$

式中，W_i 为某一污染的权重值；I_p 为单一污染物的污染指数；C_m 为某一污染物的浓度；C_b 为相对清洁区某一污染物浓度。

冠层水分利用效率 E_{wu}

王慧：环境因子对冬小麦水分利用效率的影响．生态学报，1996，16(6)

$$E_{wu}=\frac{\lambda\gamma}{\rho c_p}\cdot\frac{c_a'-c_c'}{e_s(t_c)-e_z}\cdot\frac{r_a+r_{st}}{r_a+1.56r_{st}+r_{mt}'}$$

式中，ρ 和 c_p 分别为干空气的密度和定压比热；λ 为凝结潜热；γ 为湿球系数；c_a' 和 c_c' 分别为冠层外大气和叶绿体内部 CO_2 浓度；$e_s(t_c)-e_z$ 为叶-气水汽压梯度；r_a 为冠层湍流边界层阻力；r_{st} 为冠层总气孔阻力；r_{mt}' 为冠层对 CO_2 扩散的总叶肉阻力。

生态环境的差异性分析模型

刘荣堂：赛加羚羊生态适应性研究——生态环境的差异性分析．生态学报，1997，17(2)

(1) 原始资料标准化模型：

$$X'=\frac{X_{is}'-X_{s\min}}{X_{s\max}-X_{s\min}}$$

$$(i=1,2,\cdots,43)$$

$$(s=1,2,\cdots,11)$$

式中，$X_{s\min}$ 为第 s 个因子在各样点的极小值；$X_{s\max}$ 为第 s 个因子在各样点的极大值；$X_{si}'\in[0,1]$。

(2) 欧氏距离模型：

$$d_{ik}=\sqrt{\frac{1}{m}\sum_{s=1}^{m}(X_{is}'-X_{ks}')^2}$$

$$(i,j=1,2,\cdots,42;\ k=43)$$

(3) 模糊相似优先比 r 模型：

$$\begin{cases} r_{ij}=\dfrac{D_{ik}}{D_{ik}+D_{jk}} \\ r=1-r_{ij}\end{cases}$$

杉木林生物生产力格局的数学模型

罗天祥，赵士洞：中国杉木林生物生产力格局及其数学模型．植物生态学报，1997，21(5)

(1) 林分生物生产力 Y 模型：

$$Y=\sum b_if(X_i-K_i)+a$$

$$(i=1,2,\cdots,p)$$

式中，b_i 为变量系数；a 为常数项；p 为生态因子数；X_i 为第 i 个生态因子；K_i 为第 i 个生态因子阈值；$f(X_i-K_i)$ 为因不同森林树种类型而异的关系表达式。

(2) 杉木林生物生产力 P_{np} 水热优化模型：

$$P_{np}=A_0-A_1(X-K_1)^2-A_2(Y-K_2)^2-A_3(X-K_3)^2$$

式中，A_0、A_1、A_2 和 A_3 均为大于零的方程系数；X 为热量因子；Y 为水分因子；K_1、K_3 和 K_2 分别为热量和水分因子的生态阈值。

土壤呼吸速率 V

刘绍辉，方精云，清田信：北京山地温带森林的土壤呼吸．植物生态学报，1998，22(2)

$$V=\frac{(h-h')(c_2-c_1)\times44\times100}{0.082(273+T')t}$$

式中，h 和 h' 分别为容器高和插入土层的深度；c_1 和 c_2 分别为测量时间前后的 CO_2 浓度；T' 为地表温度；t 为测量时间。

农田蒸散 E_a

刘绍民，刘志辉，傅玮东：作物农田蒸散计算模型的研究．生态学杂志，1998，17(4)

$$E_a=\begin{cases}0 & (W<W_f)\\ E_pf(B)f(S) & (W_f<W<W_k)\\ E_pf(B) & (W>W_k)\end{cases}$$

式中，PE，$f(B)$ 和 $f(S)$ 分别为农田蒸发力、作物生物学特性函数和农田土壤水分有效性函数；W 为农田土壤湿度；W_f 为凋萎系数；W_k 为临界土壤湿度即农田蒸散开始受土壤水分影响时的土壤湿度。

冬小麦冠层对光合潜能影响的分析模型

林忠辉，周允华，王辉民等：青藏高原冬小麦冠层几何结构、光截获及其对光合潜能的影响．生态学报，1998，18(4)

(1) 叶日积(D_{la})模型：

$$D_{la}=\sum\frac{1}{2}(L_{n+1}+L_n)(t_{n+1}+t_n)$$

式中，L_n、L_{n+1}为t_n和t_{n+1}时的叶面积指数。

(2) 叶倾角(θ_L)下相对叶面积分布函数$g(\theta_L)$：

$$g(\theta_L)=\sum_{i=1}^{n}L_i\theta_i\Big/\sum_{i=1}^{m}L_i$$

式中，L_i和θ_i分别为叶面元的倾角和面积；m为某一档叶倾角下的叶面元数；n为叶面元总数。

(3) 透过率τ_P方程：

$$\tau_P=\left(\tau_D+\tau_S\frac{S'}{D}\right)\Big/\left(1+\frac{S'}{D}\right)$$

式中，τ_D和τ_S分别为冠层对P_{AR}散射辐射和直接辐射的透过率；S'和D分别为到达冠层顶部水平面上的P_{AR}散射辐射和直接辐射。

(4) 消光系数K模型：

$$K=-\ln\tau_P/L$$

式中，L为叶面积指数。

农田杂草生态位模型

郝永良，李扬汉：农田杂草生态位研究的意义及方法探讨．生态学报，1998，18(5)

(1) 杂草重要值V_i模型：

$$V_i=\sum_{i=1}^{7}A_iB_i/5C$$

式中，A_i为杂草在第i优势度级的代表值；B_i为杂草在第i优势度级出现的样方数；C为该样点中的样方数。

(2) 杂草生态位宽度B模型：

$$B=\frac{1}{S\sum_{i=1}^{s}\left(V_{ii}\Big/\sum_{i=1}^{s}V_{ii}\right)^2}$$

式中，S为样点数；V_{ii}为该中杂草在第i样点中的重要值。

(3) 杂草生态位重叠值计算模型：

1) 生态距离D_i模型：

$$D_i=(\lg a-\lg Z_i)/\lg 2$$

式中，D_i为第i样点与始端样点的生态距离；Z_i为第i样点与始端样点间的相似系数；a为始端样点10个样方间的平均相似系数。

2) 生态距离间隔l^i模型：

$$l^i=D_i-D_{i-1}$$

3) 生态位重叠值O_n模型：

$$O_n=\frac{\sum_{i=1}^{r}\min\left[f_j(X^i),f_{j-1}(X^i)\right]l^i}{\max\left[\sum_{i=1}^{r}f_j(X^i)l^i,\sum_{i=1}^{r}f_{j-1}(X^i)l^i\right]}$$

式中，O_n为第j与$j-1$种杂草之间的生态位重叠值；$f_j(X^i)$,$f_{j-1}(X^i)$分别为j与$j-1$两种杂草在第i个样点中的重要值；l^i为第i个样点的生态距离间隔。

(4) 农田杂草在除草剂作用下的演变模型：

某种杂草在除草剂作用下成为新优势杂草的可能性P模型：

$$P=A\frac{O_n}{S}$$

式中，O_n为该中杂草与农田中当前某种优势种杂草的生态位重叠值，表示它们生态条件要求的相似性程度；S为该中杂草对目前使用的除草剂的敏感程度；A为修正系数。

半方差模型

王其兵，李凌浩，刘先华等：内蒙古锡林河流域草原土壤有机碳及氮素的空间异质性分析．植物生态学报，1998，22(5)

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}\left[Z(x_i)-Z(x_i+h)\right]^2$$

式中，$\gamma(h)$为所有空间相距h的点对的平均方差；$N(h)$为空间具有相同间隔距离h(又称滞后)的点对数目；$Z(x_i)$和$Z(x_i+h)$分别为点x_i和与x_i相距h的点的某一属性或因子的观测值。

红壤丘陵小流域生物生产能力分析模型

杨汝荣：红壤丘陵小流域生物生产能力分析．资源科学，1998，20(增刊)

(1) 流域内第一性生产的光能利用率——光能利用率E_Q模型：

$$F_Q = K\frac{W_2 - W_1}{Q}$$

式中，W_1、W_2 分别为 t_1 和 t_2 两个测量时刻单位面积上植物干重中的有机物质；Q 为 t_1 到 t_2 时间内同单位面积灌层上太阳辐射能量的累加值；K 为系数，表示单位面积植物光合作用生产有机质所储存的太阳能。

(2) 流域内第一性生产的光合生产潜力分析——光合潜力 W 模型：

$$W = \frac{QE_Q}{K}$$

CENTURY 模型

Peng C, Apps M J: 模拟北半球森林生态系统净初级生产力对气候变化与火灾干扰的反应. Ecological Modellin, 1999, 122

CENTURY 模型是由 Parton 等人建立的一个植物-土壤生态系统一般计算机模型，它模拟了包括草地、农田、热带或亚热带稀树大草原及森林等各种植物-土壤生态系统的 C 和 N 的动力学行为。模型以月为时间单位，表达式为：

$$NPP = \min(NPP_C, NPP_N)$$

式中，NPP_C 是土壤温度、可用水及自遮蔽因子的函数，表示气候条件对 NPP 的限制。

$$NPP_C = NPP_{max} f_T(T) f_M(M) f_S(S)$$

式中，NPP_{max} 是 NPP 的理论最大值；$f_T(T)$ 是温度对生长的影响；$f_M(M)$ 是土壤水分的影响；$f_S(S)$ 是自遮蔽效应的影响

$$NPP_N = S_i(N_{avail}W_{root} + N_{fix})F_i(C/N)_i$$

式中，N_{avail} 是可用无机氮(包括土壤中溶解氮及植物储存氮)；N_{fix} 是植物固定的氮；W_{root} 是植物从根部吸收的营养成分的权重因子；F_i 是植物吸收的可用氮分配到第 i 种植物组织中的比例；$(C/N)_i$ 是第 i 种植物组织中的碳氮比例。

由于 CO_2 浓度的提高而导致的生长提高可以用一个对数反应函数来描述(Goudri-aan, 1992; Polglase and Wang, 1992; Friedlingstein et al., 1995; King et al., 1995)：

$$NPP_E = NPP_0[1 + \beta \lg(CO_{2E}/CO_{20})]$$

式中，NPP_E 和 NPP_0 分别是在 CO_2 浓度提高及控制下的环境中相应的净初级生产力 β 是一个经验参数，其取值在 0 到 0.7 之间。

野火扩散的运算法则

Perry G L W, Sparrow A D, Owens A F: GIS 支持下的新西兰 Cass 盆地野火空间结构仿真模型. The Journal of Applied Ecology, 1999, 36

(1) Tridgell 和 Gill (1990)给出一个计算任意方向 θ 上的扩散率的表达式：

$$R(\theta) = \frac{F(1-e)}{1 - e\cos(\theta - \omega + 180)}$$

式中，R 是扩散率；F 是向前扩散的速率；e 是扩散椭圆的离心率；ω 是风向。

(2) Green, Tridgell 和 Gill (1990)提出了森林和草原地区扩散椭圆离心率的经验公式：

$$e = \sqrt{1 - \exp(0.0058 - 0.0324w^{1.2})} \quad (森林)$$

$$e = \sqrt{1 - 0.826w^{-0.928}} \quad (草原)$$

式中，w 是风速。

根冠关系模型

冯广龙，罗远培：土壤水分与冬小麦根、冠功能均衡关系的模拟研究. 生态学报，1999，19(1)

$$\begin{cases} \dot{R}_w(t) = a_{11}R_w^2(t) + a_{12}R_w(t) + a_{13}(t)S_w^2(t) + \\ \qquad a_{14}(t)S_w(t) + a_{15}(t)W(t) + a_{16} \\ \dot{S}_w(t) = a_{21}S_w^2(t) + a_{22}S_w(t) + a_{23}(t)R_w^2(t) + \\ \qquad a_{24}(t)R_w(t) + a_{25}(t)W(t) + a_{26} \end{cases}$$

式中，$a_{ij}(t)(i=1,2; j=1,2,\cdots,6)$ 为未知时变参数；R_w，S_w 分别为根重和冠重；W 为根层内土壤有效储水量。

生态环境评价模型

赵名茶，张明：青海南部地区生态环境质量评价模型. 资源科学，1999，21(3)

(1) 太阳总辐射 Q 模型：

$$Q = Q_A\left(a + \frac{bn}{N}\right)$$

$$Q_A = \frac{T_0 I_0}{L\pi}(\omega_0 \sin\varphi \sin D + \cos D \cos\varphi \sin\omega_0)$$

式中，Q_A 为大气上界太阳辐射；a、b 为系数；n 为可能日照时数；N 为实际日照时数；T_0 为 1d 的时间；I_0 为太阳常数；L=59 为热量单位；ω_0 为时角；φ 为太阳赤纬；D 为地方纬度。

(2) 光合潜力 $F(g)$ 模型：

$$F(g)=q(1-\alpha)(1-H)(1-\lambda)$$

$$\beta B/(ewg)$$

式中，q 为光量子能量；α 为草场对光量子能量的反射率；H 为透射率；λ 为投射到非光合器官上的能量比值；β 为呼吸消耗；B 为草场建群种的遗传系数；e 为经济系数；w 为水分系数；g 为无机质含量成分。

(3) 光量子能量模型：

$$q=Q\eta_T$$

式中，q 为量子通量密度；η_T=0.46；Q 为太阳总辐射。

气候变化所引起的河流排水量模型

Peterson J T, Kwak T J：土地利用与气候变化对河内小嘴鲈鱼的影响模型 Ecological Applications, 1999, 9(4)

$$R_2=R_1\times10^{1.77\lg(100P_2/P_1)+0.06\Delta T-1525}/100$$

式中，R_1 和 R_2 是指与原降水率 P_1 和设计降水频率 P_2 相对应的排水量，ΔT 是设计的温度变化。

孢粉总数与孢粉浓度模型

许清海，孟令尧，阳小兰等：应用花粉分析预报板栗产量的研究 植物生态学报，1999，23(4)

(1) 孢粉总数 Q 模型：

$$Q=\frac{S}{N}E\frac{L_0}{L_1}\frac{V_0}{V_1}\frac{F_0}{F_1}$$

式中，S 为镜检统计的孢粉数；N 为镜检总行数；E 为镜检玻片数；L_0 为每张镜检片的宽度；L_1 为显微镜一个视域的直径；V_0 为每个样品的总体积；V_1 为镜检所取的体积；F_1 为实验室分析所用的纱网面积；F_0 为滤网总面积。

(2) 孢粉浓度 C 模型：

$$C=\frac{Q}{WS_0}$$

式中，Q 为每个滤网收集的花粉数；W 为该滤网收集期内的风程；S_0 为纱网面积。

有机质的重量损失模型

王彦辉，Rademacher P，Fölster H：环境因子对挪威云杉林土壤有机质分解过程中重量和碳的气态损失影响及模型 生态学报，1999，19(5)

$$G_v=\left\{\frac{W}{W_{max}}T(T_{max}-T)\left[a\left(1-\frac{W}{W_{max}}\right)+b\right]+c\right\}G_{org}$$

式中，G_v 为重量损失速率；W 为年均含水量；W_{max} 为使好气性微生物停止活动的某个较高含水量；T_{max} 为使所有微生物停止活动的某个较高温度；T 为人工气候箱内的年均空气温度；G_{org} 为被分解物的有机物含量；a、b 和 c 为待拟合参数。

CO_2 浓度增长对杉木针叶光合特性的影响模型

张小全，徐德应，赵茂盛等：CO_2 增长对杉木中龄林针叶光合生理生态的影响 生态学报，2000，20(3)

$$P_n=C_1\left[1-\exp\left(-\frac{C_2\text{PAR}}{C_1}\right)\right]$$

式中，P_n 为净光合速率；PAR 为光合有效辐射强度；C_1 和 C_2 为参数。

着火时间分布 $A(t)$

Weir J M H, Johnson E A, Miyanishi K：加拿大西部混生泰加林的火灾频率与空间年龄构成 Ecological Applications, 2000, 10(4)

$$A(t)=\begin{cases}\exp(-\lambda_1 t) & (0\leqslant t<P_1)\\ \exp[-\lambda_1 P_1-\lambda_2(t-P_1)] & (P_1\leqslant t<P_2)\\ \exp[-\lambda_1 P_1-\lambda_2(P_2-P_1)-\lambda_3(t-P_3)] & (0\leqslant t<P)\end{cases}$$

式中，t 是着火的时间；P_1 和 P_2 分别表示最近的和最具有历史意义的变化点的日期；λ_i 是指在第 i 个时期燃烧的概率，$i=1,2,3$。

农村可持续发展评估模型

Schultink G：关键环境指标 — 农村可持续发展评估模型与执行指标 Ecological Modelling, 2000, 130

(1) 粮食产量响应公式：

$$1-\frac{y_a}{y_m}=k_y\left(1-\frac{ET_a}{ET_m}\right)$$

式中，y_a 是实际粮食产量；y_m 是最大粮食产量；k_y 是产量响应因子；ET_a 是实际土壤水分蒸发蒸腾损失总量；ET_m 是最大土壤水分蒸发蒸腾损失总量。

(2) 复合环境风险指示器：

$$R_n=\sum r_n p_n v_n-t_n$$

式中，r 是风险的期望量级或程度(表示为社会费用)；p 是暴发概率(%)；v 是目标群体的易损性；t 是可能的风险减小因子；n 是涉及的风险数量。

土地资源环境状况评价指标

Popp J H, Hyatt D E, Hoag D：环境状况的指标模型——关于土地资源与可持续发展的案例研究. Ecological Modelling, 2000, 130

(1) 农田生产力的一般模型：

$$Y = f(x_i^{rm}, x_j^{ru}, rq) \quad i=1,\cdots,I, j=1, \cdots,J, \forall i \neq j$$

式中，Y 是农田的生产力；x_i^{rm} 表示资源使用为中性的输入；x_j^{ru} 表示消耗资源的输入；rq 表示资源质量。

(2) 土地质量指标 I_{sq}：

$$I_{sq} = \sum_{i=1}^{r} (C_{saw_i} D_{sb_i} H_{sp_i} M_{so_i} F_{wi})$$

式中，I_{sq} 表示土地质量指标，取值从 0 到 1；C_{saw}、D_{sb}、H_{sp} 和 M_{so} 分别是植物根部每个土地层水分含量、土壤密度、pH 和有机质对植物生长的满足程度；r 是以 10cm 为单位土壤的分层数。

(3) 农业产出的动力学模型：

$$\max\Pi = \sum (1+r)^{-t} [P_y f(Q_{st}, L_t, N_{st}, N_t, P_t, W_t) - u_1 L - u_2 N - u_3 P - u_4 C_s]$$

限制条件：

$$Q_{st} = h(Q_{st-1}, L_t, C_{st})$$
$$N_{st} = k(N_{st-1}, N_{t-1}, L_{t-1}, Y_{t-1}, H_{lct-1})$$
$$H_{lct} = m(N_{st}, N_t, L_t, W_t, Y_t)$$

式中，Π 是折现后 T 年内的净收益；Q_s 为土地质量；W 为降水量；对土地的利用，如耕地(L)；对土地的中性输入作用，如土壤氮(N_s)、耗用氮(N)、喷施杀虫剂(P)；P_y 为产品的价格；u_i 为是各种管理措施的费用；C_s 为是土地保护措施；H_{lc} 为是土壤氮的流失率；r 为折现率。

环境质量系统分析模型

Pykh Y A, Kennedy E T, Grant W E：环境质量指标的系统分析方法概述. Ecological Modelling, 2000, 130

(1) 环境因子的响应函数：

$$\varphi(x) = \prod_{i=1}^{n} f_i(x_i)$$

式中，$\varphi(x)$ 是环境因子 $[x_1(t),\cdots,x_n(t)]$ 总的响应函数；$f_i(x_i)$ 是第 i 个因子 x_i 的部分响应函数。

(2) 热力学形式的环境质量指标(I_{eq})：

系统的热力学自由能(Ex)可作为候选的环境质量指标，其一般方程为：

$$Ex = RT \sum_{i=1}^{n} [C_i \ln(C_i / C_{eq,i}) - (C_i - C_{eq,i})]$$

式中，R 是理想气体常数；T 是环境温度(K)；C_i 代表某个环境成分 i 的浓度；$C_{eq,i}$ 是成分 i 在环境中的热力学平衡态的浓度；n 是环境中考察成分数目。

转化产物二次作用空间范围的测度模型

Quartier R, Herold U M：环境中转化产物的二次作用空间范围. Ecological Modelling, 2000, 135

$$\rho_{AB} = (\rho_A + \rho_B) \times \exp\left[\frac{\rho_A^2 + \rho_B^2 - \max\{\rho_A, \rho_B\} | \rho_A - \rho_B | F(0)}{\min\{\rho_A, \rho_B\}(\rho_A - \rho_B)} - 1\right]$$

式中，A 为原化学物质；B 为转化化学产物；ρ_{AB} 为二次转化产物作用空间范围；ρ_A，ρ_B 分别为物质 A，B 的一次作用范围，同时得到 $F(0)>1$ 和 $\max\{\rho_A, \rho_B\}\rho_{AB} < 1.4843\max\{\rho_A, \rho_B\}$。

主要生态环境质量现状评价模型

曲向荣，张海荣，程全国：辽东湾湿地环境保护与资源持续利用对策. 生态学杂志，2000，19(4)

(1) 河流水质现状与评价模型：

$$SW_i = C(X)$$

式中，S 为参与评价总因子数；W_i 为污染级别；C 为超标项目数；(X)为超标项目。

(2) 近海海域环境水质现状与评价：

1) 单项评价因子的分指数模型：

$$P_i = \frac{C_i}{C_{si}}$$

式中，P_i 为第 i 项污染物的分指数；C_i 为第 i 项污染物的实测浓度；C_{si} 为第 i 项污染物的评价标准浓度。

2) 多项污染物的综合质量指数 I_{wq} 模型：

$$I_{wq} = \sqrt{\frac{P_{max}^2 + P_s^2}{2}}$$

式中，P_{max} 为各项污染物的最大分指数；P_s 为各项污染物的分指数平均值。

储草面积模型

宛新荣，钟文勤：布氏田鼠越冬集群储草面积的两种估算方法比较. 生态学杂志，2000，19(4)

$$S_r = \pi(r_1 r_2 \cdots r_n)^{2/n}$$

$$S_1 = \frac{W_T}{W_S} \cdot \frac{N_s}{D}$$

式中，S_r 为依圆面积公式计算的储草面积；r_i 为依洞群大小选取的跑道延伸距离；S_1 为洞群有效储草面积；W_T 为洞群中储草总重量；W_S 为储草草样重量；N_s 为储草草样中黄蒿根数目；D 为样地非洞群区黄蒿的密度

生态环境综合评价指数

胡孟春，马荣华，吴焕忠：海南省生态环境综合评价制图方法 地理学报，2000，55(4)

(1) 标准化处理模型：

$$a_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \times 10$$

（某一评价因子具有一个指标项 X）

$$a_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \times 5 + \frac{Y_i - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}} \times 5$$

（某一评价因子具有两个指标项 X 和 Y）

式中，a_i 为某一指数相第 i 级标准化值；X_i、Y_i 为某一指标项第 i 级值；$X_{\max}$、$Y_{\max}$ 为某一指标项最高阈值；$X_{\min}$、$Y_{\min}$ 为某一指标项最低阈值

(2) 加权求和模型：

$$E_j = T_{ai}T_e + S_{ai}S_e + P_{ai}P_e$$

式中，E_j 为第 j 评价单元生态环境综合评价指数；T_{ai} 为地形第 i 级标准化数值；T_e=0.2 为地形权重；S_{ai} 为土壤第 i 级标准化数值；$S_e = 0.3$ 为土壤权重；P_{ai} 为植被第 i 级标准化数值；$P_e = 0.5$ 为植被权重

河流系统生态环境需水量概算模型

李丽娟，郑红星：海滦河流域河流系统生态环境需水量计算 地理学报，2000，55(4)

(1) 河流基本生态环境需水量(W_b)模型：

$$W_b = \frac{T}{n}\sum_{i}^{n} \min Q_{ij} \times 10^{-8}$$

式中，Q_{ij} 为第 i 年第 j 个月的月均流量；$T = 31.536 \times 10^{8}$；s 为换算系数；n 为统计年数

(2) 河流输沙需水量(W_s)模型：

$$W_s = S_t / C_{\max}$$

式中，S_t 为多年平均输沙量；$C_{\max} = \frac{1}{n}\sum_{i}^{n} \max C_{ij}$ 为多年最大月平均含沙量的平均值；C_{ij} 为第 i 年 j 月的月平均含沙量；n 为统计年数

(3) 湖泊洼地生态环境需水量(W_1)模型：

$$W_1 = \sum A_i (E_i - P_i)$$

式中，A_i 为某一湖泊洼地的水面面积，E_i 为相应的水面蒸发能力，P_i 为湖泊洼地上的降水量

差异指数 $VI(2^k)$

赵晓冬，于振良：林窗模型的几个基本问题的研究 Ⅱ．模拟样地个数的效应 生态学杂志，2000，19(5)

$$VI(2^k) = 1 - \frac{\left(\sum_{y=21,120}\sum_{s=1,20} \alpha_k \alpha_{k-1}\right)^2}{\left[\left(\sum_{y=21,120}\sum_{s=1,20} \alpha_k^2\right) \times \sum_{y=21,120}\sum_{s=1,20} \alpha_{k-1}\right]^2}$$

式中，$\alpha_k = BB(10y, s, 2^k) - BB(\cdot, \cdot, \overline{2^k})$；$\alpha_{k-1} = BB(10y, s, 2^{k-1}) - BB(\cdot, \cdot, \overline{2^{k-1}})$；$BB$ 为平均生物量

物种对于给定群丛的特异性和确限度模型

Pasinelli G, Naef-Daenzer B, Schmid H et al：瑞士鸟类地理分布及其与环境状况的关系 Global Ecology and Biogeography, 2001, 10

$$A_{ij} = N_{\text{sites}ij} / N_{\text{sites}i}$$

$$B_{ij} = N_{\text{sites}ij} / N_{\text{sites}j}$$

$$I_{\text{val}ij} = A_{ij} B_{ij} 100$$

式中，A_{ij} 和 B_{ij} 分别是一个物种对于一个给定群丛的特异性和确限度；$I_{\text{val}ij}$ 是群丛 j 中物种 i 的指数或者指数值；$N_{\text{sites}ij}$ 是含有物种 i 的群丛 j 的生境数量；$N_{\text{sites}i}$ 是所有群丛中被物种 i 占据的生境总数；$N_{\text{sites}j}$ 是群丛 j 中的生境总数

森林地块中物种成分差异性模型

Magura T, Ködöböcz V, Tóthmérész B：森林地块中栖息地破碎对步行甲虫的影响 Journal of Biogeography, 2001, 28

$$d(p,q) = 1 - \sum_{i=1}^{S} \sqrt{p_i q_i}$$

式中，p_i 是在第一参照森林地块(p)中物种 i 的相对频率；q_i 是在第二参照森林地块(q)中物种 i 的相对频率；S 是物种的总数

综合污染指数 I

杨海龙，叶居新：江西省水生维管束植物群落与环境因子关系的初步研究．生态学杂志，2001，20(1)

$$I=\sum_{i=1}^{n}\frac{C_i}{S_i}$$

式中，C_i 为污染物的实测值；S_i 为地面水环境质量标准值；n 为项数。

有机氮的净矿化与硝化量模型

苏波，韩兴国，黄春梅等：东灵山油松纯林和油松-辽东栎针阔混交林土壤氮素矿化/硝化作用研究．植物生态学报，2001，25(2)

$$W_i=W_v VR_{\min}(或R_{\text{nitri}})t/1000$$

$$R_{\min}(或R_{\text{nitri}})=\frac{C_1-C_0}{t}$$

式中，W_i 为第 i 个培育时期内土壤的净矿化与净硝化量；W_v 为土壤容重；V 为一公顷面积 0~15cm 土层土壤体积；$R_{\min}$(或R_{nitri})为矿化(或硝化)速率；C_1 和 C_0 分别为培育前后土壤中 NH_4^+-N 与 NO_3^--N_t（或 NO_3-N）的浓度；t 为培育天数。

矿化作用与硝化作用方程

周才平，欧阳华：温度和湿度对暖温带落叶阔叶林土壤氮矿化的影响．植物生态学报，2001，25(2)

（1）矿化作用方程：

$$R_m=e^{a+(b+c\theta)T+(d+e\theta)T^2}$$

（2）硝化作用方程：

$$R_n=e^{a+(b+c\theta)T+(d+e\theta)T^2}$$

式中，R_m、R_n 分别为矿化速率和硝化速率；θ 为土壤含水量；T 为土壤温度；a，b，c，d 和 e 均为方程的常量。

稳态光响应特性模型

张小全，徐德应：18 年生杉木不同部位和叶龄针叶光响应研究．生态学报，2001，21(3)

（1）净光合速率 P_n 模型：

$$P_n=P_{\max}\left(1-C_0 e^{-\frac{\alpha PPFD}{P_{\max}}}\right)$$

式中，$P_{\max}$ 为最大净光合速率；α 为表观量子效率；C_0 为一度量弱光下净光合速率趋近于零的指标。

（2）光补偿点 P_{lc} 模型：

$$P_{lc}=\frac{P_{\max}\ln C_0}{\alpha}$$

森林群体遗传动态的遗传标记监测模型

郑勇奇：用遗传标记监测不同环境和经营措施下的加勒比松森林群体遗传动态．生态学报，2001，21(3)

（1）Hardy-Weinberg 平衡状态下的等位基因频率 P_i 模型：

$$P_i=\frac{N_{ii}+\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n}N_{ij}}{N}$$

式中，P_i 为一个位点第 i 个等位基因 A_i 的频率；N_{ii}，N_{ij} 分别为观测到 A_iA_i 和 A_iA_j 的基因型个数；N 为分析的样本总数。

（2）基因多样性(杂合度)H_e 模型：

$$H_e=\sum_{i=1}^{n}p_i(1-p_i)$$

式中，n 为等位基因数。

（3）Nei 氏遗传距离 D_N 模型：

$$D_N=-\ln J_{xy}+\frac{1}{2}\ln J_x+\frac{1}{2}J_y$$

$$J_{xy}=\sum_{i=1}^{n}p_{i,x}p_{i,y}$$

$$J_x=\sum_{i=1}^{n}p_{i,x}^2$$

$$J_y=\sum_{i=1}^{n}p_{i,y}^2$$

式中，$p_{i,x}$，$p_{i,y}$ 分别为群体 x，y 中第 i 个等位基因的频率

UV-B 辐射对香蕉的影响模型

孙谷畴，赵平，曾小平等：UV-B 辐射对香蕉光合作用和不同氮源利用的影响．植物生态学报，2001，25(3)

（1）在羧化限制条件下叶片所达到的光合速率 A_{nc} 模型：

$$A_{nc}=\frac{V_{C\max}(P_i-\Gamma^*)}{P_i+K_c\left(1+\frac{O}{K_o}\right)}-R_d$$

式中，V_{Cmax} 为羧化最大速率；O 为叶绿体羧化部位的 O_2 浓度；K_c、K_o 分别为 Rubisco 羧化反应和氧化反应的米氏常数；P_i 为在较低细胞间 CO_2 分压；R_d 为光下呼吸速率；Γ^* 为不包括光下呼吸的 CO_2 补偿点。

(2) 在 RuBP 再生受限制下所达到的光合速率 A_{nj} 模型：

$$A_{nj} = \frac{J(P_i - \Gamma^*)}{4(P_i + 2\Gamma^*)} - R_d$$

式中，J 为给定光强下的电子传递速率。

(3) 表观量子产率 α_A 与光能转化效率 δ 关系模型：

$$\alpha_A = \frac{\delta\left(1 - \dfrac{\Gamma^*}{P_i}\right)}{4\left(1 + \dfrac{2\Gamma^*}{P_i}\right)}$$

(4) 叶氮在 Rubisco 的分配系数 P_R 模型：

$$P_R = \frac{V_{C\max}}{6.25 V_{cr} M_A N_m}$$

式中，V_{cr} 为 Rubisco 比活，即单位 Rubisco 酶蛋白的最大 RuBP 羧化速率；M_A 为单位叶面积干重；N_m 为氮含量。

(5) 叶氮在生物力能组分的分配系数 P_B 模型：

$$P_B = \frac{J_{\max}}{8.06 J_{mc} M_A N_m}$$

式中，J_{mc} 为每 mol 细胞色素每秒传输 mol 电子数。

(6) 氮在叶绿体捕光叶绿素蛋白复合体的分配系数 P_L 模型：

$$P_L = \frac{C_c}{N_m C_B}$$

式中，C_c 为叶绿素含量；C_B 为结合类囊体膜蛋白的复合体的叶绿素，其值为 5.79。

人工神经网络与遗传算法

李哲，张军涛：人工神经网络与遗传算法相结合在作物估产中的应用——以吉林省玉米估产为例．生态学报，2001，21(5)

(1) 面向神经网络权重学习的遗传算法——评价函数模型：

$$f = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} e_i^2}$$

式中，$\sum_{i=1}^{n} e_i^2$ 为运行后返回误差平方和。

(2) 遗传算法与神经网络的结合：

1) 输入层对隐含层的激活值 b_i 模型：

$$b_i = f\left(\sum_{h=1}^{n} a_h V_{hi} + \theta_i\right)$$

式中，$i = 1,2,\cdots,p$；a_h 为输入层节点；V_{hi} 为输入层到隐含层的连接权重；θ_i 为隐含层单元的阈值。

2) 激活函数模型：

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

3) 输出层节点的激活值 C_j 模型：

$$C_j = f\left(\sum_{i=1}^{p} W_{ij} b_i + \gamma_j\right)$$

式中，W_{ij} 为隐含层到输出层的连接权重；γ_j 为输出层单元的阈值；W_{ij} 和 γ_j 为按概率 $e^{|y|}$ 确定的随机数。

SCS 模型的降雨-径流关系模型

史培军，袁艺，陈晋：深圳市土地利用变化对流域径流的影响．生态学报，2001，21(7)

$$\begin{cases} Q = \dfrac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} & (P \geqslant 0.2S) \\ Q = 0 & (P < 0.2S) \end{cases}$$

式中，Q 为径流量；P 为一次降雨的降雨总量；S 为流域当时的最大可能滞留量。

风成沙丘固定程度综合指数

韩广，张桂芳：风成沙丘固定程度的定量分析．生态学报，2001，21(7)

$$a = \left|\sum_{i=1}^{10} w_i x_i\right|$$

式中，a 为沙丘固定程度的综合指数；w_i 为变量 i 的权重；x_i 为变量 i 的实测值。

植被覆盖率及其对土壤性状的影响模型

陈浮，濮励杰，彭补拙等：新疆库尔勒市土地利用变化对土壤性状的影响研究．生态学报，2001，21(8)

(1) 植被覆盖率：

$$C = \left(1 - \frac{P_v}{P_o}\right) \times 100\%$$

式中，P_v为植被透光率；P_0为露天透光率。

(2) 土壤侵蚀空间分布模型：

$$S_{nt} = C_{sn} \times BD \times DI \times 1000/T$$

式中，S_{nt}为样品所在区年平均侵蚀模数；C_{sn}为样点^{137}Cs含量的变化率；BD为样品所在区土壤容重；DI为采样间距；T为本研究发现^{137}Cs含量最高值的年份与采样时间所在年差值的绝对值。



附　　录

几个重要的综合模型

附录 A　全球环境综合评估模型(IMAGE)

1. 模型概述

全球环境综合评估模型(the integrated model to assess the global environment, IMAGE)是全球变化研究的一个动态且综合的评估模拟框架。IMAGE 模型的主要目标是通过对社会-生态-气候系统之间的主要过程及其相互作用的相对重要性进行定量分析研究，为全球环境的综合评估提供科学理解与决策支持。IMAGE 模型为全球变化因果关系的长期动态监测、深入研究全球变化的各种响应、开展全球变化研究的各种战略选择提供了定量化基础。IMAGE 模型框架包括以下三个子系统：①能量-产业系统 (the energy-industry system, EIS)，主要是研究区域性能量消耗、能量效用提高、燃料替代、化石燃料的供给与交换以及再生能量技术等方面的科学问题。在能量耗用和工业生产的基础上，能量-产业系统(EIS)能够对温室气体(GHG)、原始臭氧、酸化合物的排放量等进行科学计算。②陆地环境系统(the terrestrial environment system, TES)，是在考虑地方性气候与地形特征的情况下，以区域性消费、食物的生产与交换、动物饲料、草与木料等为基础，对土地利用变化进行计算。陆地环境系统(TES)还能够对土地利用变化、自然生态系统与农业生态系统中的气体排放量和陆地生态系统与大气系统之间 CO_2 的交换量进行计算。③大气-海洋系统(the atmospheric ocean system, AOS)，是在考虑海洋中 CO_2 含量增加和大气化学的基础上，通过 EIS 与 TES 中的气体排放量和其他因素对大气组分的变化进行测算。目前，AOS 通过解析由于温室气体、气溶胶和海洋热传输所引起的辐射强度变化来对气候特征的变化进行计算。

在能量-产业系统(EIS)、陆地环境系统(TES)和大气海洋系统(AOS)等三个子系统有机构建的 IMAGE 模型中综合集成了人口-健康综合模型(PHOENIX)、世界经济模型(WorldScan)、陆地植被模型(TVM)、农业经济模型(AEM)、土地覆盖模型(LCM)、土地利用排放模型(LUEM)、全球环境综合评估模型目标的能量区域性模型(TIMER)、能量与产业排放模型(TEM)、陆地碳模型(TCM)、海洋碳模型(OCM)、大气化学模型(ACM)、上涌-扩散气候模型(UDCM)、地理模式-尺度模型(GPS)、土地退化模型(LDM)、海平面上升模型(SLRM)等 15 个模型，这些子模型在整个全球环境综合评估模型(IMAGE)中是相互制约、互为动态关联与综合运用的，它们之间错综复杂的系统响应关系，可以通过附图 1 进行表示。而且在整个社会-生态-气候系统的定量化分析研究中，各个子模型均承担着不同且又相当重要的角色。

IMAGE 模型的各个子模型都具有各自的适用和运行范围，都具有相应的特征参数，以及输入、输出、概念和数学表达式，下面将对其进行一一阐述。

2. 人口-健康综合模型(PHOENIX)

人口死亡率的迅速下降导致了过去几个世纪里世界人口数量以空前速度增加，在工业化程度不高的国家尤为突出。为了提供未来人口发展的合理性评价方法，研究工作者进行了出生率和发病率/死亡率相关过程的深入调研。在 TARGETS1.0 仿真模型中，Rotmans 和 De Vries 等人把人口-健康综合模型作为 TARGETS1.0 开发的一个重要部分进行开发，后来人口-健康综合模型逐步完善而形成人口-健康综合模型(the integrated population and health model, PHOENIX) (Hilderink 2000)。由 PHOENIX 模型派生的区域性人口评估模型，在世界经济模型(WorldScan)、全球环境综合评估模型目标的能量区域性模型(TIMER) 和陆地环境系统(TES)中均得以广泛运用。PHOENIX 模型包括人口子模型、出生率子模型和死亡率子模型等三个部分。

2.1　人口子模型

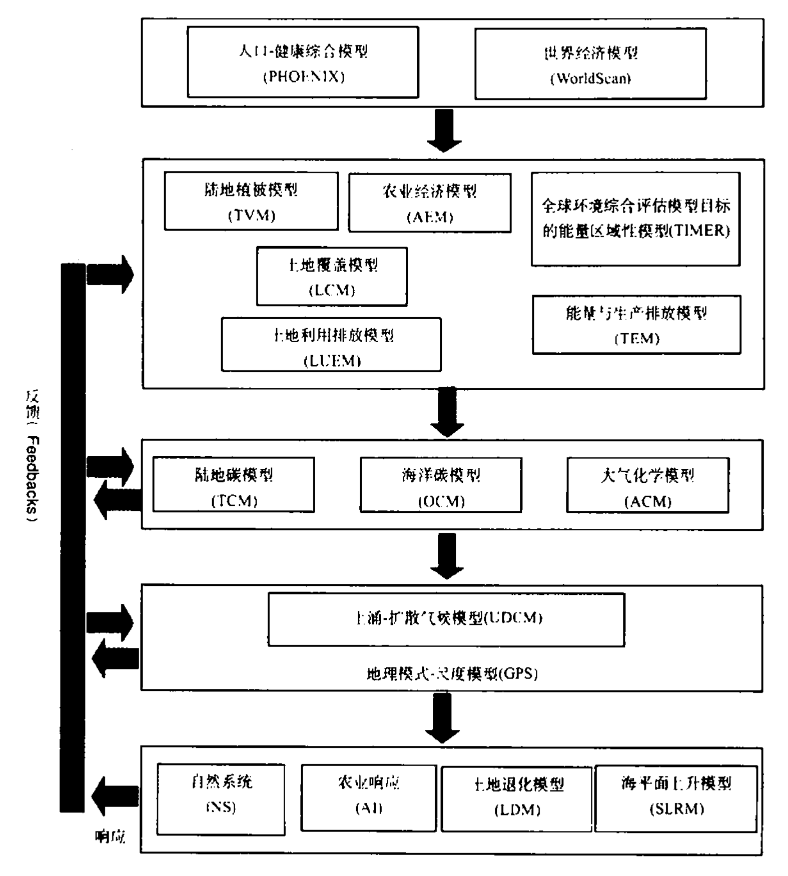
人口子模型采用的是综合系统研究方法，运用出生率和死亡率子模型的研究结果构造人口子模型效应的压力、状态、影响和响应(P-S-I-R)等子模块。

2.2　出生率子模型

人口出生是由社会、经济、文化和环境等多个变量所支配的一个生物过程，而这些影响出生率水平的变量又被一系列近似的变量因子所调节。这些近似变量因子与出生率之间的关系便构成了出生率模型所要认真研究的核心内容。出生率模型的数学表达如下：

$$TFR = C_m C_c C_a C_i TFR_{\max}$$

式中，C_m 为结婚指数，它由育龄阶段具有稳定婚姻关系的结婚和决定结婚的平均年龄决定；C_c 为避孕指数，它由控制出生的各种避孕方法的使用率和效用决定；C_i 为产后不妊指数，由育龄阶段因喂乳问题或者是有目的地节欲等方面因素而丧失生育能力的人数决定；C_a 为流产指数，是由育龄阶段流产数和因为流产而失去生育的人数共同决定的一个函数；TFR_{max} 为每个妇女在育龄阶段最多能生育的孩子数目。



附图 1　全球环境综合评估模型（IMAGE）系统框架图

2.3 死亡率子模型

死亡率子模型模拟存在着各种健康危险的人口数和与这些危险相关的死亡人数。主要的健康决定性因素是社会经济状态（SES）(Najman 1993)，更深层次的健康危险因素包括营养不良、安全饮用水的缺乏、疾病的出现、抽烟习惯的养成、高血压以及低下的医疗服务效率等。根据社会中对死亡率和疾病水平基本性的经验评估，可将健康危险因素归纳为 12 个种类，这可以从国际相关统计数据中加以推断论证。

3. 世界经济模型(WorldScan)

世界经济模型(world economy model, WorldScan)模型是建立在经济增长与贸易的新古典主义理论之上的一个多区域、多部门的应用型一般均衡(AGE)模型，其研究的焦点是世界经济的持续增长与贸易。WorldScan 模型区别 12 个国际性区域和 11 个部门中的 4 种能源(煤、石油、天然气、电)的供给，能源供给允许不同能量载体之间的能源相互代替与置换。在工业化国家、向工业化过渡的国家和工业化初期的国家之间的这种能源供给差别与气候变化策略的分析研究具有显著的相关性。

WorldScan 模型的运行需要各种部门的需求量、生产量、贸易模式、劳动力和资本密度，以及各种部门的能量价格和数量。在 IMAGE 模型框架里，WorldScan 模型模拟产生 TIMER 能量模型、TIMER

排放模型和土地环境系统(TES)等运行的各种关键经济变量。有关 WorldScan 模型的输入输出变量归纳如下：

输入：人口年龄分组

输出：① 区域性国内生产总值

② 工业、服务业和农业的附加产值

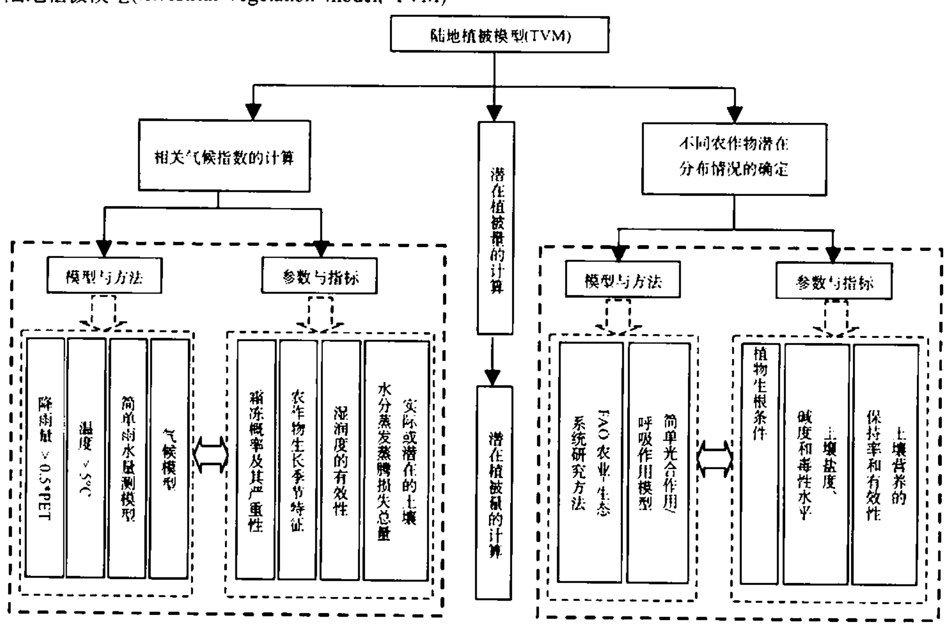
Armington 的贸易规范、低生产率部门与工业化落后国家、不可持续的消费模式和高低不齐的劳动技能是 WorldScan 模型阐述持续发展的 4 个典型的理论基础。消费者、公司、非正式部门以及劳动力与资本市场的行为同样是 WorldScan 模型运行时，必须考虑的相关因子。

4. 陆地植被模型(TVM)

陆地植被模型(terrestrial vegetation model, TVM)模拟空间分辨率为 0.5 个纬度和 0.5 个经度的基于气候条件和土壤特征的自然植被的潜在分布情况。陆地植被模型(TVM)作为陆地环境系统 (TES)的一个重要组成部分，它被 CO_2 浓度所驱动，可以通过大气化学模型(ACM)和气候变化来进行计算，也可以通过气候模型来加以模拟。陆地植被模型(TVM)的组成及其系统结构可用附图 2 进行描述，输入输出则可表达如下：

模型输入：① 温度；② 降雨量；③ 土壤质量；④ CO_2 浓度；⑤ 农作物必要的相关气候条件；⑥ 收获指数(特定的农作物种类)。

模型输出：① 生长季节的时间长度和温度；②湿润的有效性；③ 潜在植被；④ 农作物潜在生产率；⑤ 农作物减少的潜在生产率。



附图 2　陆地植被模型(TVM)的组成及其系统结构图

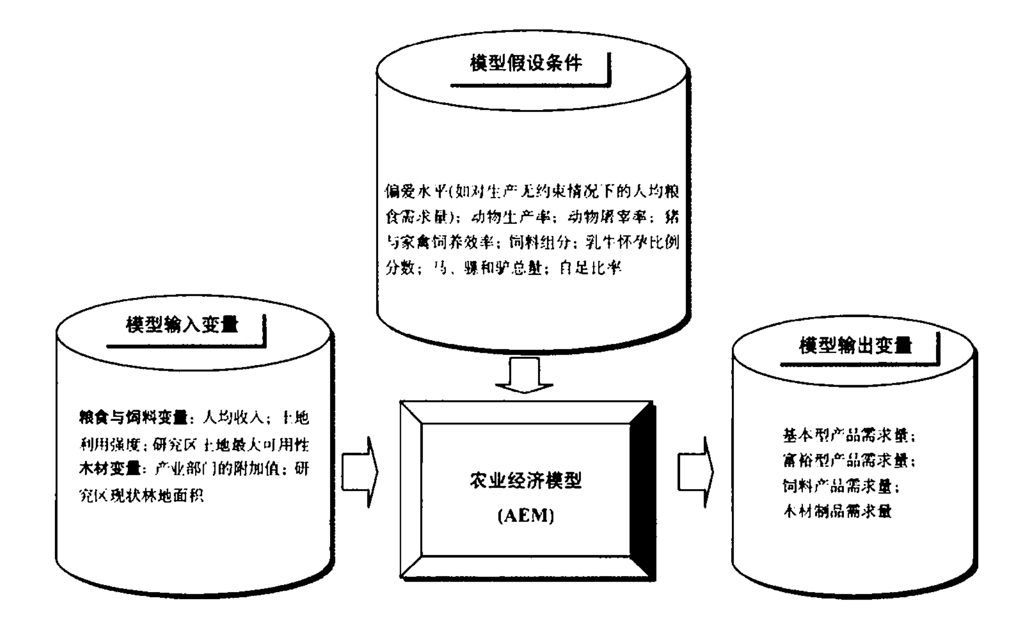
5. 农业经济模型(AEM)

农业经济模型(agricultural economy model, AEM)用于计算农作物的粮食、饲料和木材的区域性需求量，是陆地环境系统(TES)的组成部分之一。一个地区必要的生产量由此区域国内区域性需求量和贸易净产值决定。农业经济模型(AEM)的输出(包括贸易净产值)，作为土地覆盖模型(LCM)的输入，用于模拟每一个区域为了满足对粮食、饲料和木材的需求而引起的土地利用变化特征。而现代与传统对生物燃料的需求量，则是通过作为能量-产业系统(EIS)一部分的能量需求与供给模型(TIMER)来确定。虽然基于农业经济模型(AEM)的结果，粮食安全性可得以大概声明，但农业经济模型(AEM)或者是陆地环境系统(TES)并没有把详尽仿真模拟全球性的粮食需求与供给作为它们首要的研究目标。农业经济模型 (AEM)输入与输出变量运行的系统结构可用附图 3 进行描述。

6. 土地覆盖模型(LCM)

土地覆盖模型(land-cover model, LCM)的目的是模

拟全球土地利用/覆盖变化，在土地潜在承载力允许的情况下缓解土地利用的供需矛盾。模型的基本思想在不同的世界区域范围内保持土地覆盖的栅格变化，直至这些区域土地利用的需求总量得以满足为止。土地覆盖模型(LCM)同样是陆地环境系统(TES)重要的组成部分，其变化的主要驱动力除了通过农业经济模型（AEM)计算粮食与饲料的需求外，通过陆地植被模型(TVM)模拟的潜在植被变化也是土地覆盖变化的主要驱动力之一。土地覆盖模型(LCM)的输出变量将在陆地碳模型(TCM)、土地利用排放模型(LUEM)和土地退化模型(LDM)的模拟计算系统中作为输入变量加以应用，它主要的输入输出变量和假设条件如附表 1 所示。



附图 3　农业经济模型（AEM)输入与输出变量运行的系统结构图

附表 1　土地覆盖模型(LCM)输入输出和假设条件表

模型输入	土地覆盖的最初开发措施
	粮食、饲料、农作物生物燃料和木材产品的需求量
	潜在植被
假设条件	农作物减少的潜在生产力
	人口密度
	管理因素和农作物密度
	初始土地覆盖图(1970 年)
模型输出	更新的土地覆盖图(0.5 by 0.5 degree grid)

在土地覆盖模型(LCM)模拟全球性土地利用/覆盖变化的过程中，主要有以下 5 个显著步骤：① 自然植被的适应性测度；② 不适宜农用地和粗放草地的处理；③ 木材的提取；④ 现有农业用地的退耕和重新分配；⑤ 农业用地的扩张。其详尽内容请参阅文献(Alcamo et al.　1998)。

7. 土地利用排放模型(LUEM)

土地利用排放模型(land-use emissions model, LUEM)用于测算温室气体、臭氧化学气体、气溶胶、酸化物的排放量和从与自然或土地利用相关的资源中所产生的废弃物。一般情况下 CO_2 的陆地通量用陆地碳模型(terrestrial carbon model, TCM)计算，而土地利用排放模型(LUEM)则主要用于温室气体(CH_4、N_2O)、臭氧的原始化合物(NO_x、CO、 NMVOC)和酸化物(SO_2)等方面的气体排放量测算。土地利用排放模型(LUEM)主要输入输出变量详见附表 2。

土地利用排放模型(LUEM)中气体排放量可表达为如下：

$$E = AE_f$$

式中，E 为排放量；A 为活动性水平(如肥料使用、饲料吸收和生物燃烧情况等)；E_f 为排放因子。

附表2 土地利用排放模型(LUEM)主要输入输出变量表

模型输入	采伐森林过程中的C燃烧量
	种植业残余物产量
	人口数量
	收获稻子面积
	乳牛和乳牛的饲料吸收量
	动物种类显著的动物种群数
	人工合成肥料和厩肥含N的使用量
	豆类作物的产量和种植面积
	NPP、土壤肥力指数、月平均温度和土壤水分含量
	土地覆盖面积
模型假设条件	所有的排放因子*
	Savanna单位面积的C流量
	残余物比率：每一棵农作物收割后所残余的DM或N的含量
	农作物的残余物的燃烧比例
	在稻子收割总面积中灌溉稻田面积和天然降雨稻田面积各占的比例
	厩肥有效利用比例(所有厩肥减去放牧和燃烧厩肥过程中动植物的排泄物的数量)
模型输出	来自于相关原始资源和化合物的排放量

*所有排放因子和活动性水平的假设情景都是针对垃圾掩埋法、Savanna、农业垃圾燃烧、农业肥料使用而假设的。活动性水平利用情况是所有其他排放原始驱动力。

8. 全球环境综合评估模型目标的能量区域性模型(TIMER)

全球环境综合评估模型目标的能量区域性模型(TARGETS-IMAGE energy regional model, TIMER)是RIVM开发的一个全球性能量模型。TIMER模型既能作为IMAGE模型框架中的子模型，也可以单独作为进行全球性能量的仿真模拟研究的综合模型，它的主要目标是分析在一个综合模拟框架中能量存储量及非化石燃料的转换。TIMER模型是一个模拟全球性能量的系统，它不是对在理想远景基础上的一个完全模拟时期所出现的情景进行最佳选择，而是基于基础工程信息和具体标准在投资行为、燃料替代和工程技术等方面的综合结果来进行逐年投资决策的模拟。它的部分输入变量是PHOENIX模型和宏观经济WorldScan模型输出的区域性人口和经济情景的输出，其他重要的输入变量，则由能量强度发展、技术发展、资源有效性和燃料贸易中燃料偏爱度与约束条件共同组成。在区域性收入的基础上可以用它来模拟传统生物燃料的使用情况。

TIMER模型的输出变量，可以对随着时间的发展，在不同区域的能量需求量、燃料成本和供应技术竞争进行详尽的表征与描述。同时，TIMER模型的输出变量将在TIMER排放模型中计算最重要的温室气体、原始臭氧和酸化物时作为输入变量加以运用，它具体的输入输出变量详见附表3。TIMER模型包括5个重要的子模型，5个子模型在整个TIMER模型中承担的角色和它们之间的互动机制可用附图4进行表征。

附表3 TIMER模型的输入输出变量

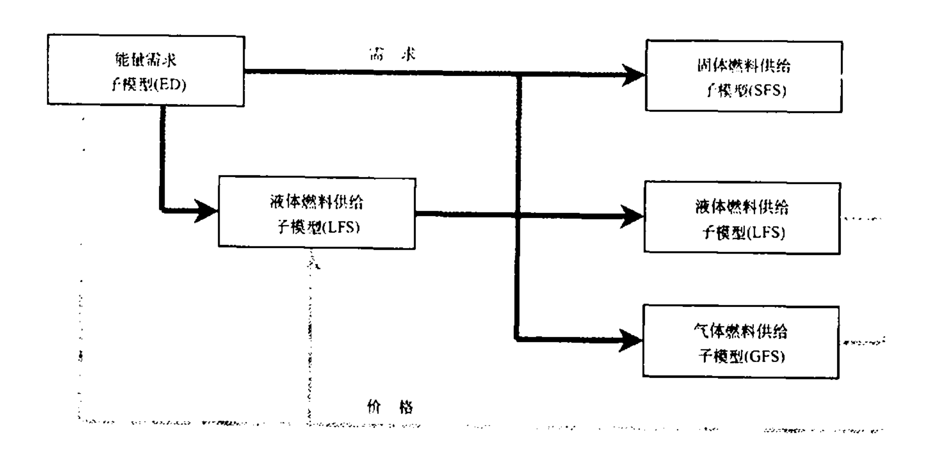
模型输入	研究区人口
	研究区宏观经济活跃水平(GDP、工业与服务业部门的附加值、私人消费量)
子模型假设条件	能量强度发展(结构变化、自动化能量效率的提高、价格的响应)
	技术发展(知识曲线)
	资源的有效性、燃料贸易中燃料的偏爱度和约束条件
模型输出	初级、二级能量载体和原料的耗用情况
	能量载体的生产
	与能量有关的工业温室气体和大气污染物的排放量

9. 能量与产业排放模型(TEM)

能量与产业排放模型(TIMER emissions model, TEM)与TIMER模型紧密相连，它主要目标是计算能量使用和产业部门生产过程中区域性气体的排放量，其排放气体主要包括温室气体(CO_2、CH_4、N_2O)、产生臭氧化合物(NO_x、CO、NMVOC)、酸化物(SO_2)、卤烃等。TEM模型由能量排放子模型和产业排放子模型共同组成。能量与产业排放模型(TEM)主要的输入输出变量可用附表4进行描述。

附表4 能量与产业排放模型(TEM)的主要输入输出变量表

能量子模型	输入变量	平均收入
		能量生产与能量终端消费量(TIMER)
		地表与深层煤矿业中CH_4比率(石油贸易流量)
	假设条件	能源部门和能量载体的排放因子(科技效率的提高、结构的转变)
		安装催化剂的汽车比率
		CO、NMVOC、NO_x、SO_2等气体管道终端控制技术的技术改进(动力电厂FGD技术、交通的燃料规格标准、工业中无污染煤的改进技术)
产业子模型	输入变量	研究区人口数量
		各种产业中能量的终端消费量(TIMER)
	假设条件	产业的各部门及其载体的排放因子
		CO、NMVOC、NO_x、SO_2等气体管道终端控制技术
		船舶燃料舱及其燃料供给量
模型输出		CO_2、CH_4、N_2O、NO_x、SO_2、CO、NMVOC、卤烃等气体排放量



附图 4 TIMER 模型中 5 个子模型之间的互动机制图

9.1 能量排放子模型

能量排放子模型通过应用型能量排放因子来计算研究区域能量相关的气体排放量。模型中的应用型能量排放因子包括能量消费与生产的 9 个能量部门和 5 个能量载体。9 个能量部门分别是：① 工业、交通、住宅、服务业(商业和公共场所)和其他部门(农业等)等 5 个能量终端使用部门；② 电力发电的能量消费部门；③ 其他形式的能量转化部门；④ 化石燃料生产部门(煤的生产、与石油生产有关的气体燃烧、气体传输等)；⑤ 船舶燃料舱(国际海上运输)。5 个能量载体分别为：固体载体(煤与煤产品)，重质液体燃料(HLF)(柴油、残余燃料油与原油)，轻质液体燃料(LLF)(LPG 与汽油)，自然的或者是从煤气厂排放的气体，现代生物燃料(如：乙醛)。能量排放子模型可以区别与 CH_4 有关的地表和地下煤炭采矿。能量排放子模型中能量载体的使用像已经处理过的化学供给燃料一样，在产业排放子模型中作为 CO_2 的非燃料资源。C 化合物的燃烧排放量的一般测算方法可表达为：

$$EM_c = EN \cdot EF_c \cdot abt_c$$

式中，EM_c 为 C 化合物的排放量；EN 为能量的消耗与生产；EF_c 为 C 化合物的排放因子；abt_c 为 C 化合物的技术消除和表征缓解的因子消除。

一般情况下 SO_2 燃烧排放量及其燃料类型可以用数学公式表达为：

$$EM_{SO_2} = EN_{power} \cdot SUC(1 - f_{ash})(1 - f_{control})$$

式中，EM_{SO_2} 为 SO_2 的燃料类型及排放量；SUC 为碳与油中的 S 含量；f_{ash} 为灰烬中硫保留的比率；$f_{control} = WTP \cdot PPP_{mult} \cdot ENV$，为排放控制中消除的 S 的比率，$WTP$ 为自动支付乘数，PPP_{mult} 为购买力奇偶乘数，ENV 为环境乘数。

9.2 产业排放子模型

产业排放子模型用于计算温室气体的排放量，或者是工业生产和能量载体与溶剂原料使用等过程中所产生的相关气体的排放量，与产业排放子模型中化合物散发相关的各种化合物的排放源可用附表 5 来进行描述。

附表 5 产业排放子模型中各种化合物的排放源

化合物排放源	化合物
水泥产品	CO_2、NO_x
能量载体供给原料的使用	CO_2
化学制造业	NMVOC
脂肪酸产品	N_2O
硝酸产品	N_2O、NO_x
氨(水)产品	NO_x
溶解剂的使用	NMVOC
钢铁工业	CO、NMVOC
硫酸产品	SO_2
铜的熔化	SO_2
各种混合物	NMVOC、SO_2

10. 陆地碳模型(TCM)

陆地碳模型(the terrestrial carbon model,TCM)用于模拟由于大气 CO_2 浓度、气候演变和不同的土地利用覆盖变化而引起的大气圈与生物圈之间 C 通量的变化。其主要的输入输出变量如附表 6 所示。陆地碳变化中的每一个元胞特征随着每个月的气候(温度与土壤湿度)、土壤质量及自然与农业用地覆盖的变化而变化。元胞中的生物数量由有生命生物数量、无生命生物数量及纸浆中 C 储存量等几个不同的部分组成。

附表 6 陆地碳模型(TCM)中主要的输入输出变量

模型输入	原始与变更的土地利用覆盖图(LCM)
	潜在植被数量(TVM)
	CO_2 浓度(ACM)
	温度图(GPS)
	湿度有效性(TVM)
假设条件	土壤肥力与海拔高度
模型输出	净初级生产力(NPP)和土壤呼吸通量
	净生态系统生产力(NEP)与土地利用 CO_2 的排放量

陆地碳模型(TCM)被净初级生产力(NPP)所驱动，NPP 指植物的光合作用减去植物的呼吸作用，是一个气候、土壤、大气 CO_2 浓度、海拔高度、土地覆盖类型与覆盖历史等因子共同作用的函数。土壤呼吸作用是因土壤有机质的转换而引起的大气中的 C 通量。气候反馈是指植物生长过程中温度和 CO_2 浓度的影响作用和土壤呼吸的影响，它通过每个研究单元中的温度、土壤水等特征因子共同决定的响应函数(每隔几个月)来进行计算(Klein Goldewijk et al. 1995)。关于土地覆盖中 NPP 和 NEP 影响，在土地碳模型中可用土地覆盖的四个主要相互转化类型加以区分，它们是自然植被向农业用地的转化、农业用地向自然土地覆盖类型的转化、森林向再生森林的转化和一种自然植被向另一种自然植被的转化。

综上所述，陆地碳模型(TCM)能够确定影响土地利用变化的动力因子，识别和量化气候、CO_2 浓度及土地利用等一系列变化结果在陆地生物圈之间的重要反馈过程，评估 C 储量的潜力。

11. 海洋碳模型(OCM)

海洋碳模型(the oceanic carbon model, OCM)和 Bern-CC 模型(the bern carbon cycle model) 主要是用于基于大气与海洋表面的 CO_2 浓度，计算大气与海洋之间 C 通量，它是一个盒子状扩散型的海洋碳模型。海洋碳模型(OCM)基于一个混合的层状脉冲响应函数，它考虑了怎样描述由大气中 CO_2 浓度变化而引起海水化学依赖于时间的非线性作用，此化学均衡中非线性变化的出现涉及到了由未离解的 CO_2、HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 等离子所形成的缓冲系统。海洋碳模型(OCM)主要的输入输出变量如附表 7 所示。大气中 CO_2 增量的计算公式为：

$$N_a = E_{fossil} + E_{land\ use} - NEP_t - N_0 (in\ PgCyr-1)$$

式中，N_a 为大气中的 CO_2 增量；E_{fossil} 为能量与产业中 CO_2 的排放量；$E_{land\ use}$ 为土地利用变化过程中 CO_2 排放量；NEP_t 为茂盛植被对 CO_2 的吸收量；N_0 为海洋的 CO_2 吸收量。

附表 7 海洋碳模型(OCM)的主要输入输出变量

模型输入	能量与产业资源 CO_2 排放量(TEM)
	土地利用变化过程中 CO_2 排放量(TCM)
	茂盛森林对 CO_2 的吸收量
	全球平均表面的温度变化(UDCM)
模型输出	海洋 CO_2 吸收量
	大气中 CO_2 浓度

12. 大气化学模型(ACM)

大气化学模型(the atmospheric chemistry model, ACM) 运用通过 LUEM 模型计算的自然与土地利用的相关性资源的气体排放和通过 TEM 模型计算的能量系统与产业的气体排放的总量来计算最重要温室气体和其他反应性气体的浓度。大气化学模型(ACM)主要的输入输出变量如附表 8 所示，它的 ACM 模型的输出变量(气体浓度)将在上涌-扩散气候模型(UDCM)中作为输入变量。

附表 8 大气化学模型(ACM)的主要输入输出变量

模型输入	CH_4、N_2O、NO、CO、NMVOC、CFCs、CCs、HCFCs、溴氯苯、PFCs、SF6 与 HFCs 的排放量
模型输出	CH_4、N_2O、CO、对流层臭氧、CFCs、CCs、HCFCs、溴氯苯、PFCs、SF6 、HFCs 与 OH^- 的浓度，化学和大气中 CH_4 的寿命

13. 上涌-扩散气候模型(UDCM)

上涌-扩散气候模型(UDCM)是大气-海洋系统(AOS)的核心模型，它模拟不同温室气体浓度的相互转换和模拟 SO_2 排放物进入辐射性输送(radiative forcings)而引起地球平均表面与海洋之间温度的变化与热量的交换。UDCM 模型主要的输入输出变量如附表 9 所示。

上涌-扩散气候模型(UDCM)由一个大气圈盒子、

两个陆地与两个海洋盒子组成(即北半球和南半球)。两个海洋盒子被分成40个层面，其顶部复杂的一个层面吸收太阳辐射能量，模型假设在地面以上没有能量被吸收，则气候系统的能量平衡可用下面的公式进行表达。

$$\Delta Q = \lambda\Delta T + \Delta F$$

式中，ΔQ 为辐射性输送量($J \cdot a^{-1} \cdot m^{-2}$)；$\Delta F$ 为进入海洋的净热通量($J \cdot a^{-1} \cdot m^{-2}$)；$\lambda$ 为反馈参数(逆向的气候灵敏度参数)；$\lambda\Delta T$ 为气候系统空间中热量损失的变化率。其中，ΔQ 与 ΔF 一般情况包含整个世界区域。

附表 9 上涌-扩散气候模型(UDCM)的主要输入输出变量

模型输入	温室气体与 SO_2 排放物的大气浓度
模型输出	温室气体与气溶胶的辐射性输送 全球表面温度变化和海洋温度变化

在与气候变化相关的时间尺度下，深海混合层的大气可以假设为均衡的，即：

$$C_m \frac{d\Delta T}{dt} = \Delta Q - \lambda\Delta T - \Delta F$$

式中，$\frac{d\Delta T}{dt}$ 为海洋上部层面每年温度的变化($K \cdot a^{-1}$)；C_m 为海洋混合层面热容量的有效体积。海水吸收的热量通过扩散与上涌的方式在每一个海洋盒子里进行传输。

14. 地理模式-尺度模型(GPS)

在用上涌-扩散气候模型(UDCM)对全球平均气温变化进行模拟时，必须考虑关于温度变化、降雨量变化等地理隐含地图的尺度问题。在 IMAGE 2.2 中，陆地环境系统(TES)所包含的模型都需要二维 (0.5 by 0.5 degree grid)的逐月气候资料。关于地理模式-尺度模型(GPS)研究的标准和方法，Carter 等在 1994 年就做了详细阐述。GPS 模型中主要的输入输出变量如附表 10 所示，在其研究过程中主要的假设是气候线性变化对温室气体传输的响应是线性的，而对气溶胶传输的响应则是非线性的，在地理模式研究方法中，分别给气候线性变化对温室气体与气溶胶的传输响应加以适当的权重，获取各种地理模式的数学表达公式如下：

$$T_{\text{cell}(m)}(t) = \frac{\Delta T_{\text{GCM,cell}(m)}}{\Delta \overline{T}_{\text{GCM,global}}} \cdot \Delta \overline{T}_{\text{GCM,global}}(t)$$

式中，$T_{\text{cell}(m)}$ 为 GCM 模型运行过程中 t 年相对于初始年的栅格单元气温，在 IMAGE 2.2 中的初始年为 1990 年；$\Delta T_{\text{GCM,cell}(m)}$ 为 GCM 模型运行输出的栅格单元的气温变化；$\Delta \overline{T}_{\text{GCM,global}}$ 为从 GCM 模型运行中获得的全球平均表面温度变化；$\Delta T_{\text{GCM,global}}(t)$ 为从 GCM 模型运行中获得的 t 年全球平均表面温度变化。

附表 10 地理模式-尺度模型(GPS)的主要输入输出变量

模型输入	每年全球平均表面温度变化
模型输出	每月区域性温度与降雨量变化，每天温度变化(0.5 by 0.5 degree grid)

15. 土地退化模型(LDM)

土地退化模型(LDM)包括对水侵蚀所引起的土地退化过程的定性描述。土地退化模型(LDM)主要的输入输出变量如附表 11 所示，它的研究是在水土侵蚀敏感性与灵敏度概念分析的基础上进行的，水土侵蚀的敏感性是根据地面侵蚀度和降雨侵蚀率的现状来进行分析和确定的，而水土侵蚀灵敏度则描述的是在特定的土地利用和土地覆盖类型的情况下，短时期内水土侵蚀发生的概率的大小，因此，水土侵蚀的敏感性实际上代表了裸土表面水土侵蚀的灵敏度。地面侵蚀、降雨侵蚀、水土侵蚀敏感性、土地利用强度和水土侵蚀灵敏度之间的动力机制可用附图 5 进行表征。

附表 11 土地退化模型(LDM)中主要的输入输出变量

模型输入	降雨量
	在恒定时间内的有雨天数
	在恒定时间内的土壤侵蚀度(根据土壤粗密度、松密度和深度来进行确定)
	在恒定时间内的土地退化的缓解指数
	土地覆盖类型
假设条件	土地利用强度与土地覆盖类型相适宜
模型输出	水土侵蚀率及灵敏度

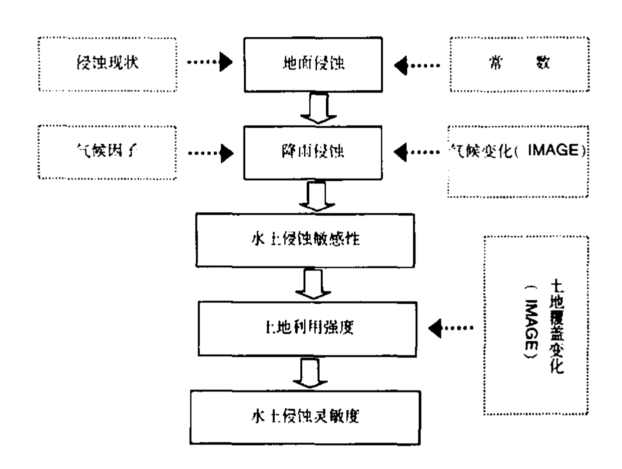
水土侵蚀敏感性和灵敏度指数的计算公式：

$$E_p = (R + T)/2$$

$$T = (SE + I_a)/2$$

$$E_a = E_p V$$

式中，R 为降雨侵蚀指数；T 为地面侵蚀指数；E_p 为水土侵蚀敏感性指数；SE 土壤侵蚀指数；I_a 为土地退化的缓解指数；V 为土地利用强度指数；E_a 为水土侵蚀灵敏度指数。



附图5 水土侵蚀灵敏度的影响因子及动力过程

16. 海平面上升模型(SLRM)

海平面上升模型(SLRM)是 Norwich 气候研究所为温室气体引起气候变化评估模型(MAGICC)的运行而开发出来的，它在 IMAGE 2.2 中用于计算全球海平面尺度的全球变暖的响应因子。整个海平面的上升是由于海洋热膨胀和大陆冰川与海洋冰川净余量的变化而导致的。在海平面上升模型(SLRM)模拟计算和运行中考虑了最为重要的冰川——格陵兰冰川与南极冰川。此模型中主要的输入输出变量如附表12所示。

附表12 在海平面上升模型(SLRM)的主要输入输出变量

模型输入	在模拟计算期间的海洋各层面全球性气温和全球平均表面温度变化(在 IMAGE2.2 中的起始年为1880年)
模型输出	由于海洋热膨胀和小冰川、格陵兰冰川与南极冰川的融化所贡献的水而引起的海平面的变化

在荷兰公共健康与环境国家研究所的 RIVM 小组开发的 IMAGE 模型 2.2 版本的模拟运行中，采用区域性 1765~1995 年的历史资料对碳循环和气候系统进行初始化处理，并用区域性 1970~1995 年的资料对 EIS(the energy-industry system)和 TES(the terrestrial environment system)进行校准，在各种情景假设的基础上对研究区域内社会-生态-气候系统(2100 年)的各种变化进行模拟。尽管 IMAGE 模型是一个全球性的应用模型，但其所考虑完成的各种任务也得依赖于高分辨率(0.5 by 0.5 degree grid)的(土地利用/覆盖变化)陆地卫星资料，或者是依赖于世界上 17 个地区各种能量、贸易和气体排放的资料和数据。

主要参考文献

Onigkeit J, Sonntag M, Alcamo J. 2000. Carbon Plantations in the IMAGE Model- Model Description and Scenarios. Center for Environmental Systems Research University of Kassel, Germany

http://arc.rivm.nl/ieweb/Image/index.html

http://www.dpi.inpe.br/spring/program/chap8/index.html

http://www.veridian.com/offerings/offerings.asp

附录B　全球性水资源评估与诊断模型 (WaterGAP)

1　模型背景概述

通常情况下，水资源研究集中于水资源被人们高密度利用的自治区或者是农业区，或者是集中于河流盆地，因为其具有相对的封闭系统，比如在这一尺度下产生的地表径流能够被存储到需要利用的时候。然而，随着全球和区域各种尺度的科学研究与政策方针对环境议题兴趣的不断上升，在这些尺度上分析研究的需求量也在不断增长。在科学研究方面，气候变化、土地覆盖与水资源开发利用的各种现象等所引起的大尺度响应则是研究兴趣之所在(Arnell 1996)；在政策方针方面，政府和国际基金组织的研究兴趣则是评估与制定支持水资源开发利用的全球性优先权，这一兴趣赋予了不断增加的世界淡水资源情形的全球性评估单位数目的地位和作用。

在其他方面，一系列水资源分析研究的新问题相继出现：什么是由于不同水资源部门的回收而引起的目前与将来淡水资源压力；哪些河流盆地承受着异常压力，及在将来水资源利用的不同情景下水资源的相关情形将如何发生变化；气候变化将如何影响世界上不同区域的水资源可用性。所以，从事这些问题的区域性与全球性淡水资源评估新分析研究工具的发展则成为必然，而全球性水资源评估与诊断模型(WaterGAP)的核心则是回答这些水资源的新问题。

全球性水资源评估与诊断模型(WaterGAP)是德国卡塞尔大学环境系统研究中心与荷兰公共健康与环境国家研究所合作开发的，它的主要目的是提供世界上不同区域水资源现状及其利用的对比分析和评估依据和提供水资源全球性变化响应的综合长期观察基础。WaterGAP 模型属于环境模型，它探索整合，因而被归类为“综合模型”。它在一个单一的综合框架中综合集成了不同的学科研究。以上为全球水资源评估与诊断模型的产生、发展及研究目的一般概述，详细情况请查阅 Alcamo and Henrichs(2002) 与 Döll et al. (2002)的相关文献。

2. 模型组成及其功能

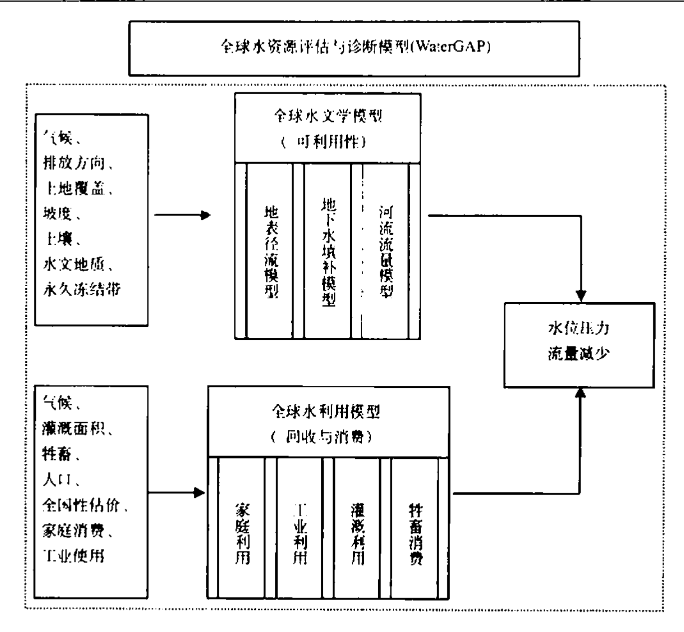
全球性水资源评估与诊断模型(WaterGAP)包括两个主要组成部分，即全球水文学模型(global hydrology model)和全球水利用模型(global water use model) (详见附图 6)。全球水文学模型模拟典型陆地水循环的宏观尺度行为，从而对水资源进行评估；而全球水利用模型则模拟计算家庭、工业、灌溉、牲畜等相关用水部门的水资源利用情况。所有的计算覆盖了地球的整个陆地表面(除南极洲之外)，计算过程中的空间分辨率为 0.5°× 0.5°，因为气候输入变量更高水平上的详细资料往往不具有可利用性，所以 0.5°× 0.5°是目前全球水文模型所能运用执行的最高分辨率。

WaterGAP 模型首次(first- order)用于计算 10 000 多个河流盆地水的利用与回收，它覆盖了除冰盖之外的整个陆地表面，任意一个河流盆地中的水都排入大海或内陆水槽，其中有 3565 个盆地的排水区域面积超过 2500km^2。为了改进水资源评估，34 个最大的一级盆地被进一步划分，它们每一个的排水区域面积均大于 750 000km^2。

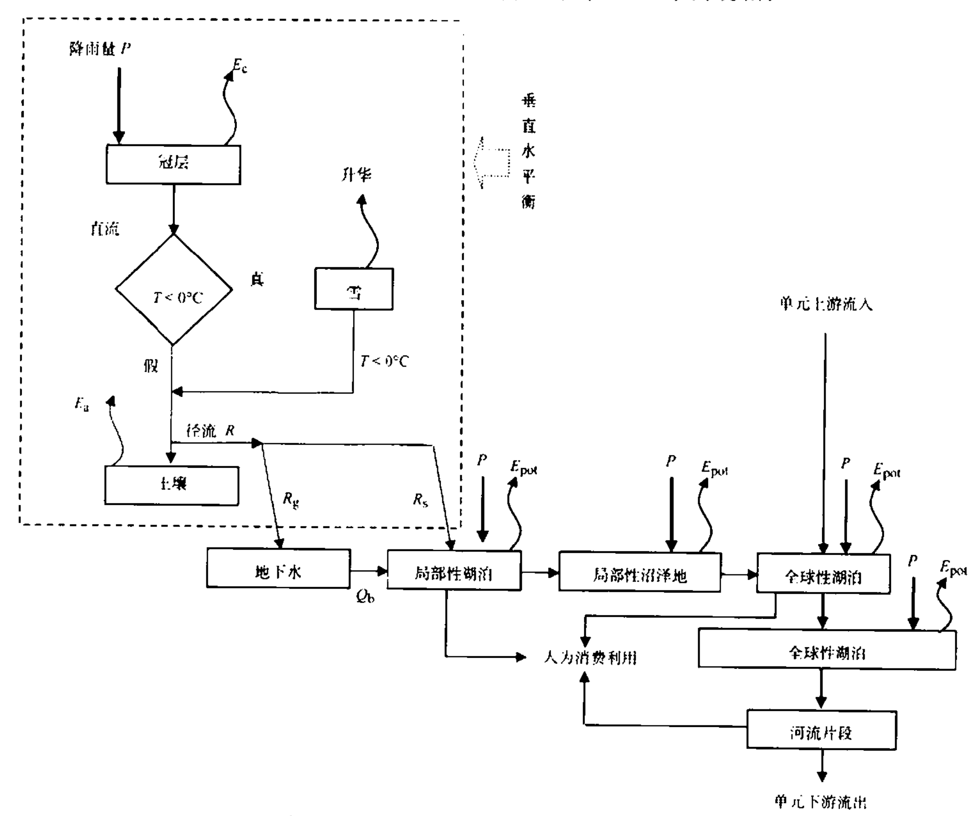
2.1　WaterGAP 全球水文学模型

WaterGAP 全球水文学模型用于计算每个单元(精度为 0.5°)陆地面积与开放水体之间的日常垂直水平衡(附图 7)。一个单元中陆地部分的垂直水平衡包括冠层水平衡和土壤水平衡，它们用土地覆盖、土壤水容量及每月气候变化参数等的函数加以计算(比如，温度、辐射和降雨量)。冠层水平衡除决定降雨过程中被冠层拦截和直接蒸发的部分之外，还决定直流到达土壤的部分。在这一水平上，土壤水平衡细分为土壤水分蒸发蒸腾损失总量和径流总量。开放水体不同的垂直水平衡实用于湖泊、水库和沼泽地，这里的径流量用降雨量与开放水体蒸发量之间的差值来加以计算。单元中的径流流失量与上游排放的流入量之间通过表征为地下水、湖泊、水库、沼泽地及河流本身等一系列的储存量来进行传输，最后整个单元的排放量传往下游的单元，从而便可获得计算河流排放量的全球排放趋势图(Alcamo and Henrichs 2002, Döll et al. 2002)。

WaterGAP 全球水文学模型中，像测量流量值百分之一范围内的长期平均年流量一样，世界范围内的 724 个排放盆地的整体排放量与其相反的标准价值之间的调整得以执行。由于排放盆地没有测量流量的数据，所以运用多元回归方法的应用软件将径流因子进行区域划分。



附图 6　全球水资源评估与诊断模型(WaterGAP)的系统结构



附图 7　WaterGAP 全球水文学模型的系统示意图

P 为降雨量；E_c 为冠层蒸散量；E_a 为土壤实际蒸散量；R_l 为陆地径流；R_g 为地下水补给；R_s 为地表径流；Q_b 为基流；E_{pot} 为潜在蒸散量

2.2 WaterGAP 模型的全球水利用模型

WaterGAP 模型的全球水利用模型用于计算家庭、工业、灌溉、牲畜等主要的水利用部门水的回收与消费情况，模型中的水回收量是指陆地水循环中水的减少总量，消费量则可理解为在水回收过程中没有返回到陆地水循环中的水量，也就是在水的各种使用过程中由于土壤水分蒸发蒸腾而损失的水量。家庭与工业部门的用水情况每年进行计算一次，而对于灌溉部门的用水情况用灌溉子模型按日为时间单位进行计算。每一个部门的用水均被作为水利用强度和驱动力的一个效用函数来加以计算，水利用强度的表征变量包括人均用水量、产生单位电能的用水量、单位灌溉面积的总灌溉水需求量和每头牲畜饮水量。

随着时间的发展，影响社会发展的结构变化和科技进步可能导致水资源利用强度的变化。结构变化是为了反映水资源利用强度变量而在模型中提出和引进的，这些水资源利用强度变量与家庭经济发展和生活方式的改变、热电厂和非热电厂的转换、农作物生长方式及其气候的变化等方面有着直接的关联作用。科技进步与结构变化是同时平行进行的，它通常能够导致用水效率的提高，从而引起水资源利用强度的减少。

模型中对于家庭和工业部门用水的历史结构变化，可以根据 Shiklomanov(1997、2000a、2000b)出版的 26 个不同世界区域的数据来进行测算评估。为了能够计算这两个部门中农村具体用水的各种情景，假定了研究区域的结构与科技进步应用于目前(1995 年)部门性水利用的农村评估(Shiklomanov 2000b、WRI 2000)。

灌溉部门用水评估依靠于灌溉子模型，它用于测算反映灌溉农作物最佳用水供给量的每个单元的灌溉水需求量(Döll and Siebert 2001)。为了计算净灌溉需求量，首先对具有水田的每个单元的作物模式与最佳生长季节进行模拟；其次，生长季节每天的净灌溉水强度用农作物具体的潜在蒸散与作物可利用降雨量之差来进行计算；再次，考虑到区域具体灌溉效率(如水的消耗与回收的比率)，对平均单位灌溉面积总灌溉水需求量要加以计算。灌溉效率及在此灌溉效率条件下的灌溉水回收率受到科技进步的影响，因此在模型中假设灌溉水的消费量不随科技进步而发生变化。

一旦每个用水部门的水利用强度被确定，那么将水利用强度分别乘以各自的驱动力便可以获得总的用水量，而每个用水部门相应的驱动力都是人口、发电量、灌溉面积和牲畜数目的农村级水平上的情景。

主要参考文献

Environmental Policy Integration and Implementation The 6th Conference of European Environmental Advisory Bodies Tuusula, Finland, 17~19 September 1998. Hosted by Council for Environment and Natural Resources, Finland

EuroWasser Model-based assessment of European water resources and hydrology in the face of global change. Kassel World Water Series. Report Number 5 Report A0104, December 2001Center for Environmental Systems Research,University of Kassel, 34109 Kassel, Germany. Internet: http: www.usf.uni-kassel.de

http://www.birkhauser.ch/journals/2700/papers/2064004/20640352.pdf

http://www.usf.uni-kassel.de/ma-gmgroup/watergap.htm

附录C　农产品及贸易政策分析国际模型(IMPACT)

1. 模型概述

20世纪90年代初为了解决未来世界粮食问题、减少贫穷和保护自然资源所采取的一系列缺乏远见和协同的行动促使国际粮食政策研究所(IFPRI)建立起了世界粮食远景规划模型，即农业用品及贸易政策分析的国际模型(IMPACT)。1993年，这些长期全球关注的问题引发了关于粮食、农业和环境的2020年情景预测的主动性研究，它为IMAPCT模型的进一步发展研究创造了机会。1995年IMPACT模型的第一个结果：全球粮食2020年远景规划——投资隐含问题 (Rosegrant et al.　1995)，作为2020年情景预测的讨论稿得以出版和发表。它研究了人口、投资与贸易情景之间的相互作用如何影响粮食安全和营养状况，尤其是发展中国家的这种作用与影响。从此以后，IMPACT模型便被应用于各种粮食、农业与环境的研究分析当中。譬如，Rosegrant等1999年发表的《世界谷物与肉类消费的选择前景》一文调查检验了发达国家很高的食肉情况是否会限制发展中国家粮食安全的提高与改进；Scott等2000年发表的《全球生根作物与块茎作物2020年远景规划》详细分析了生根作物与块茎作物，这些对于穷人来说非常重要的日用品，却经常被发达世界所忽视；Delgado 等发表的《牲畜2020年的远期预测——又一场粮食革命》对牲畜革命可能带来影响进行了评估：21世纪，发展中国家由于收入水平的提高引起对肉类食物需求量的增加，从而将会引发又一次粮食革命。这一报告对于决策者及其相关部门都是非常有用的，它考虑了许多发展中地区对牲畜需求量的现状及将来的预期发展。在IMPACT模型的研究中，对像亚洲经济危机与长期全球粮食情形(Rosegrant and Ringler 2000)、未完成的亚洲农村经济的变革(Rosegrant and Hazell 2000)这样区域性研究已经比较完善，它们是对1997年亚洲金融危机的响应性研究，分析了此次金融危机对这些地区粮食情形未来发展的冲击和影响。《全球粮食2020年远景规划》(Rosegrant et al.　2001)一书是IMPACT模型的最近研究成果，它所包括的诸项研究成果和研究工程在IFPRI组织委员会命名为“粮食可持续发展的2020远景规划”。

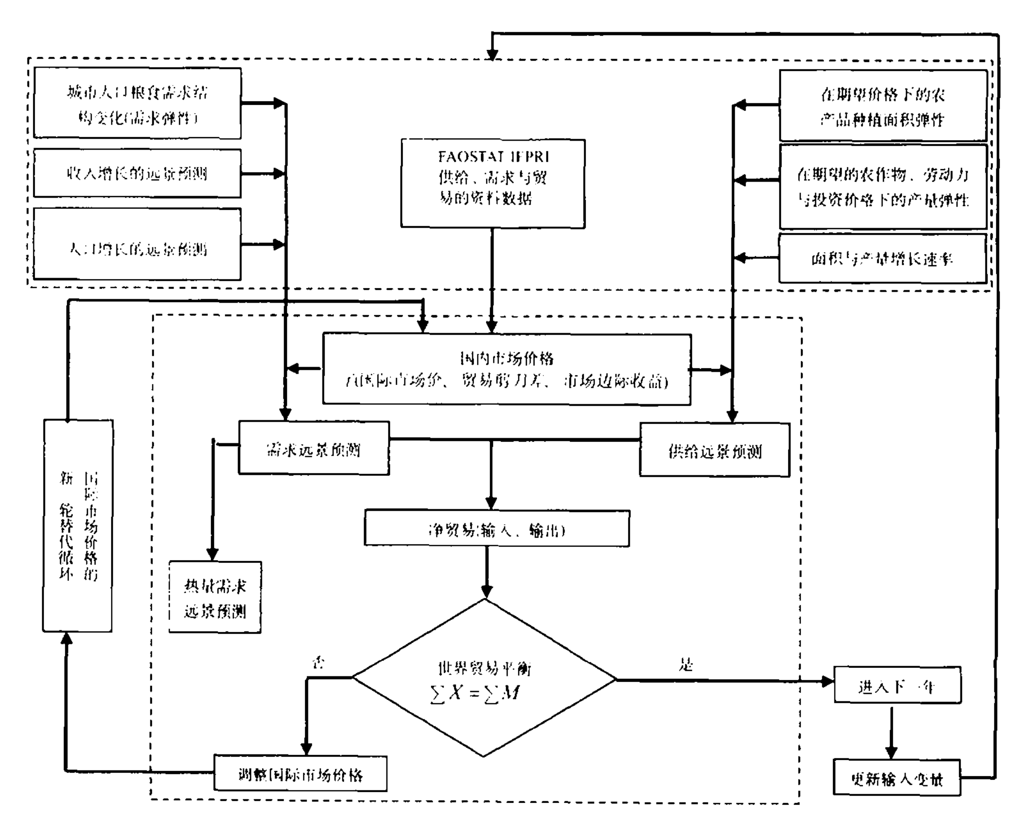
IMPACT模型被公认为是评估全球粮食情形最主要的农业部门模型之一，已经被应用于全球粮食市场一系列中期与长期政策分析。此外，在IFPRI中期的研究计划之中，IMPACT模型被应用于国际性组织的特殊工程之中，它们包括世界银行、亚洲发展银行、FAO及国家政府。国际农业用品及贸易政策分析模型(IMPACT)主要包括模型的基本研究方法及模型的技术方法两个方面的内容，下面将加以阐述。

2. IMPACT 模型基本的研究方法

国际粮食政策研究所的IMPACT模型提供了全球粮食需求、供给、贸易、收入与人口的分析方法，它覆盖了实质上能代表所有世界粮食生产与消费的36个国家与地区，以及这些国家和地区的16种日用品(包括谷类食品、大豆、根生与块茎作物、肉类食物、牛奶、蛋、油类、豆饼和膳食等)。IMPACT模型由一系列国家与区域子模型有机结合而成，它表征了农作物和牲畜的竞争性世界农业市场的系统运行机制，农产品的供给、需求与价格可通过IMPACT模型中的每一个子模型来进行确定。这些国际和区域间的农业子模型通过贸易和规范相联系，而这些规范又使得全球农业市场相互依赖性增强。为了逼近基础生产和需求函数，IMPACT模型运行的系统将供给和需求弹性融合成一系列的线性与非线性方程。每年世界农产品的价格由销售到国际市场的量所决定，需求是价格、收入和人口增长的函数，每一个国家农作物产量的增长都是由农产品价格和生产力的增长所决定的，而未来的生产力又可以通过它的构成来进行评估，农业生产力增长的构成组分主要包括农作物管理研究、传统植物育种、大范围交叉种植与杂交培植以及生物技术和转基因培育。另外，农业生产力的构成组分还应该考虑个体部门的农业研究与发展、农业的扩展与教育、农业市场的培育、农业基础设施和灌溉技术改进与提高等。IMPACT模型的系统运行机制，详见附图8。

基于IMPACT模型，可以对世界粮食形势未来发展的大范围基础性重要冲击与影响因素进行模拟。这些基础性因素包括人口与收入增长、农作物与牲畜产量及其生产水平的提高、牲畜饲养比率增大、农业研究水平提高和经费的增加、农业灌溉与其他投资比率的增大、农产品价格政策的变化、供给与需求弹性的

变动，为了对它们进行详细阐述，IMPACT模型产生了以下两方面的规划：一方面是对农作物的播种面积、收益、产量、粮食需求量、饲养及其他使用量、价格与贸易等情况远景规划；另一方面是牲畜的数量、收益、产量、需求量、价格与贸易等情况的远景规划。自1995年IMPACT模型的研究成果第一次出版发行后，IMPACT模型在不断的变化与更新，国家与区域性研究组织在35~37个之间变动，而研究的农产品种类在16~18种之间变动。目前，IMPACT模型研究中的农产品种类已扩充到31种，它们包括热带与亚热带水果、温带水果、蔬菜、糖料、甜料、8种鱼产品、鱼粉、



附图8　IMPACT模型的系统运行机制示意图

3. IMPACT模型的技术方法

3.　农作物生产模型

家庭农业生产由种植面积和产量响应函数决定，收获面积大小可以具体看成是由农产品自身价格、与之竞争其他农产品价格以及收获区内非赢利规划比例的增加等共同作用的一个响应函数，而农业收益是农产品价格、农业劳动力价格、农业投资以及反映技术进步的远期非价格外生趋势因素所共同作用的函数。第n国家的第i种农产品每年的产量则可以通过农产品的种植面积和产量来进行评估测算。农作物的收获面积、产出收益与总产量可分别用下面的方程式进行表达。

农作物面积响应方程：

$$AC_{tni} = \alpha_{tni}(PS_{tni})^{\varepsilon_{iin}} \prod_{j \neq i}(PS_{tnj})^{\varepsilon_{ijn}}(1 + gA_{tni})$$

农作物收益方程：

$$YC_{tni} = \beta_{tni}(PS_{tni})^{\gamma_{iin}} \prod_{k}(PF_{tnk})^{\gamma_{ikn}}(1 + gCY_{tni})$$

农作物总产量方程：

$$QS_{tni} = AC_{tni} YC_{tni}$$

式中，*AC*为播种面积；*YC*为农业收益；*QS*为生产总量；*PS*为有效生产价格；*PF*为因子或输入变量*k*所代表的价格；∏为求积操作符；*i,j*为特定农作物的农产品指数；*k* 为输入变量(劳动力、资本)；*n*为国家指数；*t*为时间指数；*gA*为播种面积的增长比率；*gCY*为农业收益的增长比率；ε 为面积价格弹性系数；γ 为收益价格弹性系数；α 为播种面积截取(intercept)系数；β 为农业收益截取系数。在收益函数的价格影响中考虑到了像化肥这些现代投入的增加，并将其与灌溉及相关研究得出的变量作为输入的补充。为了生成收益增长的远期时间曲线，IMPACT模型利用了农业大背景的前期和后期研究、农业生产力增长来源研究、工业化在产量增长中的作用检验研究以及专家意见等相关的研究方法（Evenson and Rosegrant 1995）。

3.2 牲畜生产模型

除仅仅由科技预期发展所影响的牲畜收益之外的牲畜生产模拟与种植业模拟相似外，牲畜头数总量是牲畜自身价格、与之竞争的农产品价格、中间输入食物的价格、牲畜屠宰数的增长趋势曲线等共同作用的函数方程，将牲畜屠宰数量与每头牲畜产量相乘，便可以计算出牲畜的总产量。牲畜屠宰数量、每头产量及总产量的测算方程式分别表达如下：

屠宰数量方程：

$$AL_{tni} = \alpha_{tni}(PS_{tni})^{\varepsilon_{iin}} \prod_{j\neq i}(PS_{tnj})^{\varepsilon_{ijn}} \times \prod_{h\neq i}(PI_{tnh})^{\gamma_{ihn}}(1 + gSL_{tni})$$

每头产量方程：$YL_{tni} = (1 + gLY_{tni})YL_{t-1,ni}$

总产量方程：　$QS_{tni} = AL_{tni} \times YL_{tni}$

式中，*AL* 为牲畜屠宰数；*YL* 为每头牲畜产量；*PI* 为中介输入饲料价格；*i, j* 为牲畜特定的商品指数；*b* 为饲料特定的商品指数；*gSL* 为牲畜屠宰数量的增长比率；*gYL* 为每头牲畜产量的增长比率；α 为牲畜屠宰数量的限制比率；ε 为牲畜屠宰数量的价格弹性；γ 为饲料价格弹性；方程中其他变量含义与农作物生产模型中的定义相同。

3.3 农产品需求模型

农产品国内需求是粮食需求、饲料需求及其他用途需求的总和。其中，粮食需求函数由农产品自身价格、与之竞争的农产品价格、人均收入、人口总量等变量共同作用决定，不同国家和地区的人口与收入增长比率，会导致不同的人均收入与人口总量增加；饲料需求则是由牲畜产量、饲料比率、饲料作物的自身价格及其与其他作物相互作用价格的影响所决定的需求驱动函数，此驱动方程还包括表征饲养有效性改进与提高的技术参数；其他用途的农产品需求可作为粮食与饲料需求的部分比例来进行估算；总需求量函数中牲畜饲料需求量仅是对粮食需求的部分而不是全部。粮食需求、饲料需求、其他用途需求和总需求函数的表达式分别如下。

粮食需求方程：

$$QF_{tni} = \alpha_{tni}(PD_{tni})^{\varepsilon_{iin}} \times \prod_{j\neq i}(PD_{tnj})^{\varepsilon_{ijn}}(INC_{tn})^{\eta_{in}} POP_{tn}$$

饲料需求方程：

$$QL_{tnh} = \beta_{tnh}\sum_{l}(QS_{tnl} \times FR_{tnhl}) \times (PI_{tnh})^{\gamma_{hn}} \prod_{o\neq h}(PI_{tnh})^{\gamma_{hon}}(1 + FE_{tnh})$$

其他用途需求方程：

$$QE_{tni} = QE_{t-1,ni}\frac{QF_{tni} + QL_{tni}}{QF_{t-1,ni} + QL_{t-1,ni}}$$

总需求方程：$QD_{tni} = QF_{tni} + QL_{tni} + QE_{tni}$

式中，$INC_{tn} = INC_{t-1,ni}(1 + gI_{tn})$，*INC* 为人均收入，*gI* 为人均收入增长率；$POP_{tn} = POP_{t-1,ni}(1 + gP_{tn})$，*POP* 为人口总量，*gP* 为人口增长比率；*QD* 为总需求量；*QF* 为食物需求量；*QL* 为饲料需求量；*QE* 为其他用途需求量；*PD* 为有效消费者价格；*FR* 为进料效率；*FE* 为饲料有效性改进效率；*PI* 为中介输入饲料价格；*i, j* 为所有农产品的商品指数；*l* 为牲畜的商品指数；*b, o* 为饲料作物的商品指数；ε 为粮食需求价格弹性；γ 为饲料需求价格弹性；η 为粮食需求的人均收入弹性；α 为粮食需求的限制比例；β 为饲料需求的限制比例；其他变量含义如前所述。公式中如果*i*属于牲畜的商品指数，*QE* 与 *QL* 均等于零。

3.4 农产品价格测算模型

价格函数是IMPACT模型中的内生函数。国际市场价格函数中的国内市场价格随着价格政策的影响而调整，它用生产补助等价物(PSE)、消费补助等价物(CSE)和市场边际收益的形式来加以表示。生产补助等价物与消费补助等价物用来测度由11个生产者与消费者相对的国际市场价格所承受的税收或补助的潜在水平和用来计算国内与国际市场的价格差，而市场边际

收益则反映了诸如交通与市场成本之类的其他因素。在农产品价格测算模型中，PSE、CSE与MI用国际市场价格的百分数表示；生产价格可通过国际市场价格的变动进行计算，此处国际市场价格的变动表征为：国际市场价格在减去市场边际收益所占比例的基础之上，再增加由生产补助等价物所占比例；消费价格同样通过国际市场价格的变动进行计算，国际市场价格的变动表征为：国际市场价格加上市场边际收益所占比例，减去消费补助等价物所占比例。因为在计算过程中使用的是批发价而不是零售价，所以中介输入饲料价格的市场边际收益是比较小的，它的价格用计算消费价格的计算方法来另外计算。生产价格、消费价格和中介输入饲料价格的具体测算公式如下。

生产价格测算公式：

$$PS_{tni} = [PW_i(1 - MI_{tni})](1 + PSE_{tni})$$

消费价格测算公式：

$$PD_{tni} = [PW_i(1 + MI_{tni})](1 - CSE_{tni})$$

中介输入饲料价格测算公式：

$$PI_{tni} = [PW_i(1 + 0.5MI_{tni})](1 - CSE_{tni})$$

式中，PW 为农产品国际市场价格；MI 为市场边际收益；PSE 为生产补助等价物；CSE 为消费补助等价物；i为所有农产品的商品指数。公式中其他变量含义如前所述。

3.5 农产品国际关联——贸易分析模型

国家与区域的农业子模型之间通过国际与区域间的贸易活动来相互连接，而一个国家的农业贸易情况则由其农产品国内生产量与消费量之差决定。虽然贸易顺差国为净出口国家而贸易逆差国为净进口国家作为一种判别标准，但这种标准是不容许用来对同时是某一特定农产品输出国和输入国的国家应该属于输出国还是属于输入国进行单独证明的。例如，如果以1997年为基准年，那么储备量的变化应该是用1996~1998年的平均水平来进行计算，因此生产与需求价格并不等于基准年的。基准年储备量变化将会在规划期的前三年逐步消失而最终达到一个长期的动态平衡，也就是说，供给需求平衡并不是以某一年的储备量变化来进行衡量的。

净贸易计算方程：

$$QT_{tni} = QS_{tni} - QD_{tni}$$

式中，QT 为贸易额；QS 为农产品国内供给量；QD 为农产品国内需求量；i 为所有农产品的商品指数。公式中其他变量含义如前所述

3.6 解决平衡条件的运算法则

IMPACT模型在综合代数建模系统(GAMS)程序设计语言中，利用高斯-赛德尔运算法则可以成功地解决系统平衡问题，此程序将国际市场水平的净贸易总量进行最小化处理，从而寻求满足市场销售条件的农产品国际市场价格。满足市场销售的条件方程可表达为 $\sum_n QT_{tni} = 0$ 。国际市场价格是供需系统的均衡机制，当模型中引起外生突然事件时，国际市场价格将进行均衡调控，并且每一次调控将通过价格传输方程反馈给有效的生产价格与消费者价格，从而引起国内市场价格的变动，国内市场价格的变动又进一步影响供求关系，供求关系变化迫使国际市场价格进行又一次的均衡调控，这种均衡调控不断重复，直到国际市场的农产品供求平衡为止。最后，国际市场净贸易量再次达到零均衡。

3.6 营养状况测定模型

为探究粮食安全问题，IMPACT模型对发展中国家营养不良的未达到入学年龄(0~5岁)的儿童数目及比例进行了规划预测研究。对于营养不良的儿童来说，体重与年龄比远远超于二倍标准偏差而低于美国国家健康统计中心和世界卫生组织设定的体重与年龄比的标准，这种标准被许多联合国的组织机构在评定发展中国家人口营养状况时所采用。IMPACT模型中这一对营养不良儿童数目研究计划源自于对营养不良儿童所占比例与几个相关因素之间的功能关系的评估，这些相关因素包括人均热能消耗量、诸如因母亲和儿童保育而引起的非食物决定性的儿童营养不良、健康与卫生设施问题等几个方面。用于IMPACT模型中营养不良儿童比例规划预测研究的功能关系评估函数可表达为：

$$MAL = -25.24\ln(KCAL_t) - 71.16LFEXPRAT_t - 0.22SCH_t - 0.08WATER_t$$

式中，MAL 为营养不良儿童人口比例；$KCAL$ 人均热量消耗的有效性；$LFEXPRAT$ 为出生时的男女预期寿命比；SCH 为从事中等教育的妇女注册总数，它用某一个年龄阶段从事国家规定的中等教育的妇女占此年龄阶段的妇女总数的比例来表示；$WATER$ 为能够使用安全水的人口比例。

模型中的非食物解释性变量的系数来自于Smith

与Haddad的评估方程，此方程与收集资料序列完全匹配。由于食物组分引起儿童营养不良的中长期函数关系类似于Smith与Haddad用"三次样条函数"方法研究的结果。在Smith与Haddad的评估方程中，评估系数的差异依赖于热量消耗特定极限的降低与上升，这是因为"三次样条函数"与相关资料能够很好匹配，以及它提供的平滑关系曲线更适合IMPACT模型中的远景规划模型。远景预测的人均热消耗量(KCAL)包括以下两个部分：①人均热消耗总量的一部分来自于模型所包括的各种农产品，这一部分的远景人均热消耗量通过模型所包含的各种农产品的人均消耗量的远景预测的转化而进行计算，此处使用FAO评价(1996~1998年)的人均食物消耗量在1997年国家平均转化水平条件下所表征的单位农产品的热转化量作为转化标准；② 人均热消耗总量的另一部分来自于模型没有包括的农产品的转化。虽然像糖料作物、果实、蔬菜等农产品目前已被加入到IMPACT模型当中，但对其热量转化进行计算的研究则几乎没有，所以农产品热量贡献的远景预测中必须同时使用基准年的热量贡献和从其他农产品中获得热量的特定收入需求弹性。平均寿命比率、妇女注册比率和使用安全水人口比例的远景预测必须基于国家平均水平的最近变化趋势，而且在模型远景预测中，必须将投资水平与收益递减预测像盛行价格的提高一样加以考虑。

根据营养不良儿童比例可以对营养不良的儿童数目进行测算，测算的表达式如下：

$$NMAL = MAL \cdot POP5$$

式中，$NMAL$ 为营养不良儿童人口；$POP5$ 为0~5岁的儿童总人口。

主要参考文献

Mark W R, Siet M, Sarah A C. 2002. International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade (IMPACT): Model Description. International Food Policy Research Institute Washington DC

http://faculty.plattsburgh.edu/thomas.wolosz/extinction.htm

http://rossby.larc.nasa.gov/IMPACT_Model_Description.html

http://www.ifpri.org

附录D Ecopath with Ecosim 系统模型

1. 模型概述

EwE(Ecopath with Ecosim)是一个世纪以前，为直接构建水陆生态系统的总体平衡营养的系统模型，并对其进行参数化处理与综合分析而设计开发出来的一个用于个人计算机的生态系统软件。虽然EwE 的研究总部在英国哥伦比亚大学渔业中心，但它在全世界均被广泛应用。Ecopath系统最初的研究是从J.J. Polovina估计水生生态系统中种或种群的单位生物量与食物消耗量开始建立起来的。随后，在生态系统基本元素的互动关系的分析研究中，Ecopath系统融合了理论生态学的各种研究方法，特别是R.E. Ulanowicz所提议研究方法。然而，Ecopath系统最优化使用是通过时间动态模型、Ecosim模型、空间动态模型和生境空间(Ecospace)模型等的综合研究而直接用于渔业评估和与环境有关的选址问题。目前，已经有代表120个国家的2000多家注册使用者，在此软件系统中已经出版发行了100多个生态系统模型。

总体平衡营养模型自20世纪80年代早期开始发展以来，逐渐组合形成了被广泛应用于海洋生态系统及其他生态系统食物网模型的构建等方面的Ecopath软件系统，它导致了诸如渔业影响相关议题等大量生态系统功能结构的基础性概括。在这些概括中，有些重新讨论相关领域的旧议题，有些则是对其他新的领域的讨论。不管是对旧议题的讨论，还是对新议题的研究，都在不断地促使着Ecopath研究方法自身的发展。在Ecopath模型中，用Ecopath的固有特征来描述生态系统的均衡状态，它同样适合于对生态系统中时空生物量与营养交换进行描述的差分方程与微分方程相结合的参数化系统。EwE模拟结果被用来对Ecopath模型的参数做进一步的修改，然后在参数修改的基础上进行循环模拟，直至达到外部确认为止(external validation)。Ecopath模型这种重新概念化的研究方法是一个重复迭代过程，它有助于从事结构不确定性议题的相关研究，但不能显著地增加它输入的必要条件。如果在半贝叶斯判决规则的重采样程序的过程中清楚地考虑与顾及了与系统相关的输入变量中数字的不确定性，那么，将有可能显著地增加系统自身输入的必要条件，从而对结构不确定性议题进行论证研究。

虽然在Ecopath系统模型中包括了大量的功能组团，但真实生态系统动态平衡的复杂性还是远大于Ecopath模型中生物量之间流通、交换的总体平衡。真实生态系统的动态性同样要比Ecosim模型所表征的动态性要复杂得多。真实系统与仿真系统现实性之间的这种差异和复杂程度在对仿真软件进行测评时必须加以考虑。当然重要的不是软件要有多么的复杂，而是它在仿真模拟某一生态系统的过程中，所能表征的现实性，也就是说仿真软件的模拟仿真过程必须以相应的生态系统特征为基础，这就限定了仿真系统的输入变量。如果按这种标准来衡量的话，EwE模拟研究显而易见的主要不足在于它在模拟运行的过程中假设空间行为是同质的。1999年Walters等人开发研制的Ecopath系统模型的动态空间版本，弥补了以前EwE模拟研究中空间均质假设的不足，它融合了Ecosim模型的所有关键性的基础理论技术。

EwE(Ecopath with Ecosim)系统软件包括三个主要的组成部分：① Ecopath模型，是生态系统一个静态的总体均衡快照模型；② Ecosim模型，是生态系统政策探索的时间动态仿真模块；③ Ecospace模型，是以探测生态保护区的影响及分配为基本理念而设计的时空动态模块。

2. Ecopath 模型

Ecopath模型的软件包主要用于分析提出相关的生态问题、评估渔业的生态系统效应、探索管理政策方针的可选方案、评价海洋保护区的响应及其位置分布、评估环境变化的影响作用等几个方面。Ecopath模型的核心程序源于1984年Polovina对初始假设稳定状态富余量响应所进行修正的Ecopath程序。Ecopath模型不再假设稳定的初始状态，而是基于在任意周期下整体性平衡假设条件下的参数化来对生态系统进行分析。通常情况下，此模型数据采集运行处理的周期为一年，但有时也讨论以季节为周期的Ecopath模型。目前运行的Ecopath参数模型基于两个主控方程，另一个用于每个种群的能量平衡模拟分析。

一个Ecopath方程用以阐述每个种群能分裂成不同组分的定期产量，具体的表达方程如下：

总产量=捕获率+掠夺死亡率+单位生物量的积累率+

净迁移量比率－其他死亡率　①

方程①可进一步用方程②来进行表示：

$$P_i = Y_i + B_i M2_i + E_i + BA_i + P_i(1 - EE_i) \quad ②$$

式中，P_i 为 i 种群的总产量比率；Y_i 为 i 种群的总渔业捕获率；$M2_i$ 为 i 种群的掠夺比率；B_i 为 i 种群的单位生物量；E_i 为 i 种群的净迁移量比率；BA_i 为 i 种群单位生物量的积累比率；$M0_i = P_i \cdot (1 - EE_i)$ 为 i 种群的其他死亡率。此方程主要用Ecopath模型对所有的死亡因素进行描述。

Ecopath模型的另外一个主控方程为：

消费量=生产量+呼吸量+未被吸收的食物量

通常情况下，一个Ecopath模型的输入变量需要单位生物量、生产量/生物量比率(或死亡率)、消费量/生物量比率以及模型中每一个基本种群的生态营养效率等四个参数中的三个。模型中的生态营养效率用来表达系统生产的消耗量。Ecopath模型建立一系列的线性方程来解决在同一运行中未知值整体性平衡的构建问题，Christensen和Walters在2000年对此研究步骤的理论方法、性能及缺陷进行了详细阐述，如要深入了解，请参阅相关文献。

Ecopath模型的构建过程通过多种研究工作直接综合提供了一个很有价值的终端产品。譬如UBC渔业中心的Sea Around Us工程所研发的普林斯·威廉声音模型(Okey and Pauly 1999)、乔治亚海峡模型 (Pauly et al. 1998)、赫卡特海峡模型(Haggan and Beattie 1999)以及几个北大西洋模型均可以说明以上观点。Ecopath模型的建设过程聚集了很多科学家、国家和联邦级水平的政府研究人员与数据、国际性研究机构、综合性大学、公众利益组织与政府机构。关键性成果包括此工程中以前被隐藏或者是很少公开的各个合作部分两两之间的数据空隙和公共目标的证明与识别。这一过程对启动研究的相关组织获得模型的所有权尤为重要，而当Ecopath模型在生态系统水平上运行时，采用多层面的战略目标作为管理程序的一部分而进行广泛讨论更是必须的。使这一工程得以容易实施的战略性探索方法包含在下面即将讨论的Ecosim模型当中

3.　Ecosim 模型

Ecosim模型提供了生态系统水平上的动态模拟性能，其关键性的初始参数继承于基础的Ecopath模型。Ecosim模型动态模拟计算所包含的内容，可概括如下：① 运用Ecopath模型的整体性平衡结果进行参量估计；② 变速分裂能有效模拟快速繁殖种群 (浮游植物)与慢速繁殖种群(鲸鱼)之间的动态变化；③ 宏观尺度比率上的微观尺度行为影响：自上而下及自下而上的一体化控制；④ 使用微分和差分方程的混合模式对于关键性生态系统种群的单位生物量与规模结构进行动态分析。作为EwE系统模型的一个组成部分，Ecosim模型包括由每月种群数及其生长发育所依赖的密度和风险系数所决定的幼体个体大小与年龄结构；通过滞后差分方程所计算而获得的成体数目、单位生物量与平均个体大小；作为幼体相互竞争与捕食的自发属性的储量补充关系。Ecosim模型使用了微分方程系统，此系统作为不同单位生物量和收获比率的时间函数，可以对生物库中的单位生物流量比率进行表示(具体的函数方程请参见Walters et al.　1997, 2000)。掠夺者之间的相互捕食强度由于掠夺的捕食行为被限制暴露而得以缓解，比如单位生物流量模式可以通过自上而下或者是自下而上的尺度变化来加以影响和控制(Walters　2000)。Ecosim模型通过反复的迭代仿真模拟，可以获得能够适合于预测单位生物量变化的时间序列数据。

3.1　Ecosim模型运用时间序列数据评估渔业与环境影响的适宜性研究

Ecosim模型仿真模拟的时间序列数据主要包括(或者是来自于)以下几个方面：相对富余的指数(测量数据)，绝对充足的评估依据和数据，捕获数据，渔船贡献数据以及鱼类的繁殖速率和总的死亡率的评估数据。

因为许多种群被综合于Ecosim模型之中，而它们的时间序列数据可以有效地从单个物种储量评估中加以提取和利用。因此，EwE构建了越来越多的传统储量评估数据模型，当需要综合评估生态系统的水平时，就可以从这些时间序列数据资料中获取有用信息。在这些时间序列数据中适合于用渔业的捕获序列数据和死亡序列数据来作为Ecosim模型运行的驱动因子。Ecosim模型的每一次运行都将产生相应时间序列数据适合度统计评估方法的一个大体轮廓。此适合度测度方法根据实际记录的单位生物量和预测单位生物量的平方差(SS)的权重求和而获得的，根据相对富余数据序列的最大可能性可以估计方程 $y = qB$ (y 为相对富余度，B 为绝对富余度)中的相对富余度的转换系数 q。每一个参考数据序列都可以赋予相应的权重，以表示先前评估中相对数据的可靠性。

在Ecosim模型中的SS测度方法允许可以进行4种类型的分析，它们分别是：① Ecosim脆弱性临界参数的灵敏度测定，它是通过对Ecosim模型的相关模型参数进行微调(通常为1%)后，让模型重新运行，从而观察SS的变化情况；② 脆弱性评估研究，是关于构建用户所期望的相似性的封闭脆弱性研究，它在较低的

SS情况下，可为Ecosim的时间序列数据提供更好的适宜性；③ 每年相对初级生产力的时间序列数值研究，它可在相应的整个生态系统中表征历史生产力结构转换对单位生物量所产生的冲击；④ 零假说的可能性分与测评研究，此处假设模拟富余度与预测富余度之间偏差完全是由于机会的单一性所引起的。

此外，超出非线性最优化程序表征的数据适宜性，可以通过EwE模型中一些相应的关键性生态参数来检测，并在EwE模型的反馈系统过程中加以改进。这里的关键性生态参数中尤为显著的是总死亡率、自上而下与自下而上的生态尺度变化控制的标准设置等。模型中重点强调数据适宜性是否不包括模型内部任何附加因子此类问题，进而取代此类问题的是在模型每一次运行过程中，是什么物种参数或者是什么生态参数设定使得模型模拟所获得的相关生境与物种随时间的变化并没有完全呈现出预料中的变化趋势。

EwE模型中所包含的时间序列数据使得基于生态系统的渔业管理措施选择方案的探索研究变得比较容易。时间序列适宜性(time series fitting)到目前为止，仅在评估为数不多的几个生态系统中得到了应用。目前运用的区域包括法国护卫舰浅滩、乔治海峡、泰国湾湾、北海，还有十几个或者更多的应用领域正朝着这个方向发展。模型运行过程中产生的一个重要的初步性结论，那就是模型能够为与某一个生态系统某一方面的生态资源相关的所有时间序列数据产生合乎逻辑的适宜性。譬如，模型运行所产生的适宜性可以与运用单个物种的多个研究模型所获得的结果进行比较。这表明Ecosim模型的运用能够反演生态系统的历史特征，或者说至少有这种可能性。相应地，它为相关研究人员与研究机构怎样使模型在政策措施探索研究中加以运用奠定了信心。

3.2 Ecosim模型在政策措施探索方面的研究

2000年7月，FAO组织在UBC召开的目的在于探索鱼类捕捞过程中如何将生态系统模型运用于有关多物种管理措施的调研与制定的研究方法。此次会议上，来自于世界各地相关领域的40多位科学家运用近20个EwE模型，对生物群落结构与渔业产量所产生的冲击和影响进行了调研和模拟分析。渔业管理的中心目标是对随着时间变化而产生的鱼类死亡率进行控制，从而成功地促使经济、社会及生态的可持续发展。因此，动态模拟与综合评估的关键性目标应该是模拟和评估相应的鱼类死亡率有多高，以及随着时间的发展它们将会发生怎样的变化。虽然，不可能期望Ecosim模型能够提供精确的最适宜性鱼类死亡率评估数据，但通过模型的模拟分析至少能够明智与谨慎地定义出最适宜性鱼类死亡率的合理范围。

EwE模型中Ecosim模块的更新，为FAO机构提供了两种探索选择性捕鱼政策之间冲击与影响的研究方法：① 随着时间变化，通过为检测每一个变化概率而设定的捕获量、经济指标及生物量变化所出现的相应结果，可以对捕鱼速度进行粗略界定。② 正规有效的最优化方法能被运用于捕鱼政策的研究当中，它将使具体的政策目的与管理措施的功能目标达到最大化，这主要体现在以下两个方面：一方面，在探索由于捕鱼方式的改变对相应生态系统所产生的影响等领域得到广泛运用。另一方面，为捕鱼政策措施研究提供了有利通道。这些探索性仿真模拟研究方法显然是为FAO机构的研究所发展起来的，它融合于EwE系统模型的软件系统当中。此研究方法认为政策研究可以像定义一个广泛定义目标的研究趋势一样来进行定义，还认为渔业政策通常是通过TAC(每年)的重新计算和通过影响鱼群结构及其配置的校准来执行和实现的。当然，到目前为止，绝大部分的渔业研究是通过渔业政策的实施来实现的，但EwE系统模型的软件工具企图逐渐让渔业科学家们去建议在渔业生态系统的研究过程中除了注意渔业政策实施方案的研究外，还应注意研究简单的政策表达公式，二者必须兼顾。

Ecosim模型用户根据渔场租金利益目标最大化、社会利益目标最大化、物种人为重建(mandated rebuilding)目标最大化与生态系统结构及其卡度的目标最大化等四个政策目标因子对政策最优化目标函数进行定义：① 渔场租金利益目标最大化因子，根据捕获价值(通过物种类别进行计算)小于捕鱼成本(固定成本与可变成本之和)的利益计算来进行利益最大化测算。如果赋予利益最大化目标因子很高的权重值，往往除了具有最大利益的鱼种外，其余大多数的鱼类的捕捉都会逐步从捕捉的范围中分离出来。而且如果只为了追求更大利益的目标物种引起的种群竞争与捕食，将会导致生态系统中一定的种群逐渐灭绝。② 社会利益目标最大化因子，它可以通过用于维持的每一条渔船(each fleet)的利用情况来进行表示。此处的利益是针对流动鱼种而言的，它可作为相对于捕获价格的工作量来加以测算。因此，社会最大化利益与捕鱼措施的改进存在着很大的正比关系。最优化的捕鱼措施往往会导致过度捕捞的极端情景，其远远超过了为谋求最大利益所容许的最优化捕捞努力量的最大捕捞程度。③ 物种人为重建(mandated rebuilding)目标最大化因子，物种人为重建目标最大化融入在捕捞过程中，捕捞的外部压力或法律决定将会迫使政策决策者将精力集中于如何保留或重建给定区域与给定物种情况下的种群关系。在Ecosim模型中为特定的物种与种群设定了相对于Ecopath模型生物量的门槛生物量，并朝着快速捕捞结构最优化方向发展，它将十分有效地保证

物种人为重建最大化这一目标因子的实现。物种人为重建(mandated rebuilding)目标最大化在特定的案例分析中所蕴藏的含义为：最优化的捕捞程序将会通过捕鱼量的增加来对种群之间相互竞争与捕食行为进行严格控制，甚至由于没有考虑社会与经济利益而导致渔业部门的倒闭。在考虑到法律因素的情况下，人们将会在案例分析研究中经常遇到以上问题。④ 生态系统结构及其丰度的目标最大化因子，是受E.P.Odum对生态系统成熟期阐述的影响而引发出来的，E.P.Odum所阐述的成熟生态系统受控于大范围的、长期的生物有机体(Christensen 1995)，因此复合生态系统的默认设置与表征长生命周期的种群测度一样，均指具体某种种群生物量与其生产力的比率。对所有的鱼类来讲，除了权重因子相对较低的目标物种以外，生态系统结构的优化均意味着捕鱼程度的缩减。

Ecosim模型内部使用的非线性最优化程序是人们熟知的通过改变相对捕捞速率来迭代改进目标函数的戴维森-弗莱彻-鲍威尔方法(Davidson-Fletcher-Powell, DFP)。在改变相应参数的情况下，DFP方法反复运行Ecosim模型。DFP方法采用的参变量方案是非常著名的共轭梯度算法，它包括检测局部相似目标函数与参量值二次函数的选择性参量值，并利用局部函数的相似性对相应的参量进行更新升级。它是处理像通过非线性动态模型仿真模拟来寻找最好的动态捕鱼模式之类的复杂及高度非线性最优化问题的有效算法之一。此处的目标函数可以被认为是一个多尺度标准的目标函数，它表征为经济、社会、法律与生态等四个目标因子的权重求和。对这些权重因子赋值的方法是根据它们相互之间的政策选择来决定怎样进行赋值，并能够减少它们之间相互冲突，能够对其进行权衡处理。实际上，FAO研究机构比较感兴趣的是在Ecosim模型运行过程中怎样平衡政策目标所引起的众多争议，而所考虑政策目标中并没有新的东西。但哪怕是盲从和定性分析研究，也仍然得花时间去研究什么观点与思想是新的，它就能够刺激FAO研究机构与其他相应的应用部门进行合作，通过对定量模型的直接集成研究将有可能最终实现目标函数所要达到的目标与要求。即使并不梦想综合研究结果能够不考虑任何内在风险和怀疑地进入现在的管理模式，但目前它有可能参与"人类希望未来的生态系统出现怎样的情景"、"人类所做的任何选择将意味着什么"等问题讨论过程，而且将具有重要的理论意义和研究价值。

捕捞政策研究程序中亲缘游移种群大小的时间序列数据评估，将会导致多尺度标准目标函数最大化。在假设每一种游移类型的捕捞努力量大于种群生物量的残留常数的情况下，Ecosim模型中的亲缘游移种群大小变量可用来计算每一种游移类型的亲缘鱼类的死亡速率。譬如，在减少游移类型亲缘鱼类百分比的同时，对捕捞速度进行相应比例的缩减，将会使得所有的种群都能够得以捕获。如果不论对任何一种或者是所有游移鱼类捕捞努力量进行缩减所引起的种群生物量缩减都能够使捕鱼速度保持较高水平的话，密度依赖可捕性影响因子便可以在Ecosim模型中加以考虑。尽管对捕捞政策研究基本理论(渔业未来管理是基于对亲缘鱼类捕捞程度控制，而不是基于多物种配额系统)做了的解释性提醒，但仍然没有实现多物种准确定量的研究分析。同时，当某一个封闭系统中的种群配额达到最脆弱物种的限度时，也没有运用一些独断的保守措施进行保护；或者是当某一个物种到达它们的限度时，同样没有允许对不经济的物种进行放弃。

如果通过捕捞努力量强度标准使未来的管理措施得以真正实现，那么鱼死亡速率的时间变化轨迹将有可能接近目标值，其中关键性的议题是怎样监测捕捞系数的调整变化以致于限制每年的捕捞努力量，从而测算捕捞效率的变化情况。此类监测对渔业部门相当重要，它可以显示捕捞过程中的高密度依赖性(strong density-dependence)。当鱼产量及其分布区域较小的时候，捕捞努力量的强度每增加一个百分点，其捕捞数量都将占去储备量很高的比例。有两种途径可以对可捕捞的鱼储备量进行监测，它们均是基于监测捕鱼死亡率 F_t、时间变化及其关系方程 $q_t = F_t/f_t$，式中的 q_t 为每种捕捞努力量的捕鱼死亡速率、f_t 为捕鱼方式。第一种监测方法，首先对每年传统生物储备量进行评估，然后对捕鱼死亡率 F_t 进行测算，测算方程为 $F_t = C_t/B_t$，式中 C_t 为捕捞总量、B_t 为脆弱性生物储备量的评估值。第二种监测方法，则是在直接对捕鱼死亡率进行监测的情况下，对在鱼资源充足的捕鱼季节期间的诸如年度标志鱼实验、年内捕鱼死亡率相对减少研究等方面的成功可能性进行评估。

为解决FAO研究机构所涉及的用户如何进行封闭循环型政策仿真的模拟问题，Ecosim模型设计了相应的工作程序，它根据单位生物量在监测过程中潜在的时空变化，以及远期捕捞努力量优化设计研究中的目标函数的不同组成部分，对前面所提到的监测方法进行测评。模型中封闭循环型仿真模拟的思想理念不仅包括生态动力系统的时间变化，而且还包括对储备量评估及调整的整个动态过程。也就是说，封闭循环型仿真模拟包括相应的动态评估了模型和受年度捕鱼强度限制的评估结果的运行了模型。

Ecosim模型的封闭循环型仿真模拟模块包括以下五个方面的内容：① 决定封闭循环随机模拟实验数量及模拟次数；② 设置用于 F 方面的年度评估类型；③ 设置年度评估的精确程度，也就是设定年度生物量或 F 评估的变量系数；④ 设置 F 所引起的每一种游

移鱼类的物种变化值或者是重要性权重；⑤ 运行模拟次数，最终显示时间序列情况下所模拟产生的平均值从以上的阐述中表明，封闭循环型政策仿真模拟包含了大范围复杂相关的年度储备量评估程序、调查设计与直接 F 评估方法等的详细情况，建议使用其他评估的模拟工具对这些详细情况进行检测，从而在运用Ecosim模型对生态系统尺度分析研究的过程中，能够很好地考虑到模拟信息的总性能。

4. Ecospace 模型

当Ecospace模型用于计算生态系统以下三个方面的时候，它将单位生物量动态地分布于栅格地图之上：① 一个栅格单元向周围相邻的四个栅格单元均匀地演替变化，从而模拟相应的渔业生态系统的变化，而并不强调所定义的栅格单元是否是动植物的首选生境；② 用户自定义非首选生境中掠夺行为风险的增加与饲养比率的减少；③ 在每一个栅格单元中，捕捞努力量的强度水平正比于捕鱼的总收益率，而且捕捞的分布情况与捕捞成本的相互牵制极为敏感。到目前为止，可利用的Ecospace应用性评估模型仍然为数不多，但是通过大范围有用性数据资料的大量测试运行表明：Ecospace模型像Ecosim模型一样，能够帮助解决Ecopath模型构建过程中的结构不确定性问题。因此，掠夺者摄食行为类型的定义必须使它与在相同生境的被掠食者能够有效地相遇。实际上，前面的阐述可以表明：虽然Ecopath模型没有明确地考虑空间问题，但它却隐含了与Ecospace模型所定义的生境类型相应的特征食物网的空间子系统(Okey, et al. 1998)。此外，生态空间子系统的定义引发了更多借助于Ecosim模型的强有力仿真模型，从而渔业生态系统的空间分析模式也就相应地从那些为人类提出海洋保护区(MPAs)的避难所的掠夺行为中诞生了。

在给定的系统结构下，用户可以把Ecospace模型当作一个探索海洋保护区(MPAs)潜在位置的工具来使用，从而减轻或改善捕捞过程对生态系统多样性的影响，尤其减轻对深海食物网捕捞的破坏和影响。一些生物量的储存库可以对相关的营养流进行特定功能的服务，但并没有直接涉及到它们。对于多数生态系统来说，仍然需要相关研究人员对Ecospace模型做大量的研究工作，并使之成为一个有用的政策探测研究工具。案例研究经验表明：在特定的情况下，Ecospace模型对种群随季节或个体发育的迁移指向及个体消散趋势的研究是相当重要的，它可以提供比综合性Ecopath分析更好的方法来对不同生境中营养流之间的细微差别进行分析研究。当然，将自然生境的变量特征与相应生境类型进行关联设计也是必须的

主要参考文献

Baird D, Ulanowicz R E. 1989. The seasonal Dynamics of the Chesapeake Bay Ecosystem. Ecol. Monographs 59(4): 329~364

Beattie A I, Sumaila U R, Christensen V, Pauly D. (submitted for review). Marine Protected Areas in the North Sea: A Preliminary Bioeconomic Evaluation Using Ecoseed, A New Game Theory Tool for Use with the Ecosystem Simulation Ecopath with Ecosim. Nat. Res. Modeling

Christensen V, Walters C J, Pauly D.2000. Ecopath With Ecosim:A User's Guide. Fisheries Centre University of British Columbia Vancouver, Canada and International Center for Living Aquatic Resources Management Penang, Malaysia

Christensen V, Pauly D. 1992. ECOPATH II - A Software For Balancing Steady-State Ecosystem Models and Calculating Network Characteristics. Ecol. Modeling 61: 169-185

Christensen V. 1995. Ecosystem maturity - Towards Quantification. Ecol. Modelling. 77:3~32

Christensen V. 1998. Fishery Induced Changes in a marine Ecosystem: Insights from Models of the Gulf of Thailand. Journal of Fish Biology 53 (Supplement A): 128~142

Christensen V, Walters C. In press. Ecopath with Ecosim: Methods, Capabilities and Limitations. In Pauly D, Pitcher T(eds.): Methods for Assessing the Impact of Fisheries on Marine Ecosystems of the North Atlantic. Fisheries Centre Research Reports 8(2)

Christensen V, Walters C J, Pauly D. 2000. Ecopath with Ecosim: A User Guide. Univ. of British Columbia, Fisheries Centre, Vancouver, Canada and ICLARM, Penang, Malaysia (inpress)

Haggan N, Beattie A (eds.). 1999. Back to the Future: Reconstructing the Hecate Strait Ecosystem. Fisheries Centre Research Reports 7(3). 65

Pauly D, Christensen V, Walters C. 2000. Ecopath, Ecosim, and Ecospace as Tools for Evaluating Ecosystem Impact of Fisheries. ICES J. Mar. Sci. 57: 697~706

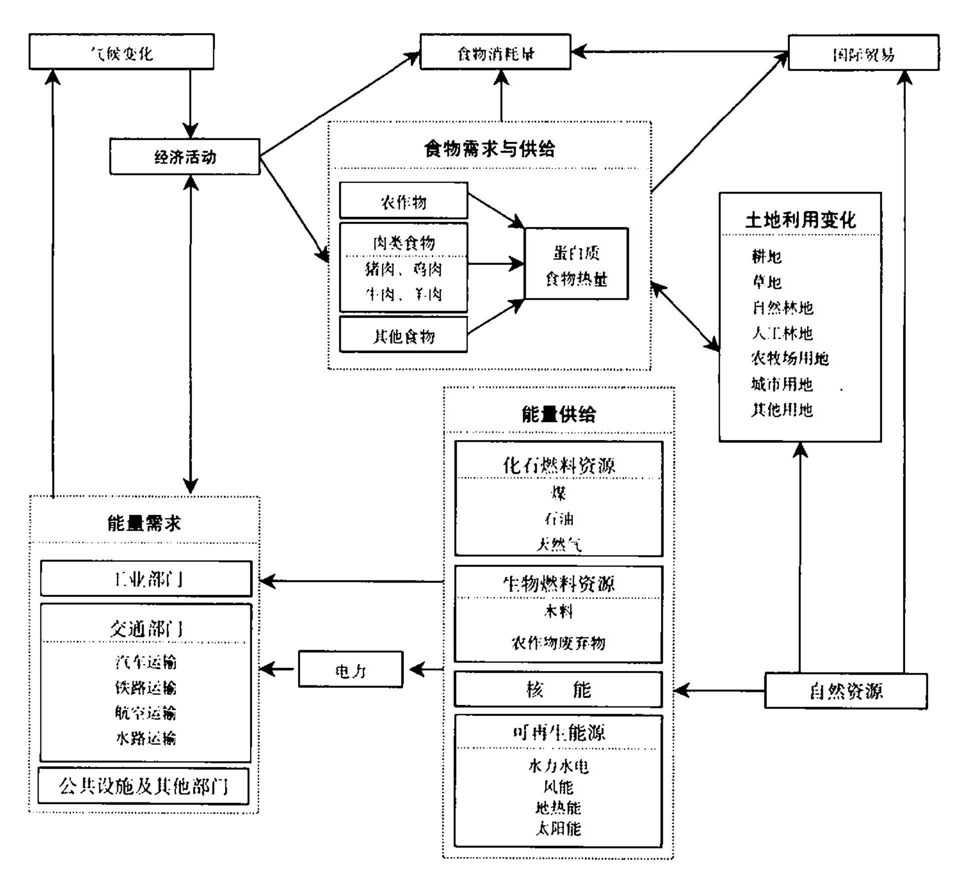
Walters C J. 2000. Impacts of Dispersal, Ecological Interactions and Fishing Effort Dynamics on Efficacy of Marine Protected Areas: How Large Should Protected Areas Be? Bull. Mar. Sci. 66(3) (in press)

http://www.ecopath.org/

附录E　多区域性资源与产业配置的综合研究模型(MARIA)

1. 模型概述

资源与产业配置的多区域综合研究模型(multiregional approach for resource and industry allocation model, MARIA)，是一个用于评估经济、能量、资源、土地利用及全球气候变化之间相互关系的综合评估模型(Mori and Takahashi 1999，Mori 2000)。1994年，Nordhaus对起源于气候与经济模拟的动态综合模型(the dynamic integrated model of climate and the economy model, DICE)的MARIA模型进行了发展研究。针对全球变暖问题，MARIA模型已经发展了包括全球能量流的评估及世界区域性划分技术与方法在内的综合评估技术及相应政策选择方案。MARIA模型正如Manne and Richels在1992年全球2100年发展规划中所提出的那样，目前已经逐渐发展成为处理全球性八个区域之间国际贸易的实时动态非线性最优化模型。MARIA模型运行处理的8个区域分别为：NAM区域(美国与加拿大)、日本、其他OECD国家、中国、东南亚国家(印尼、马来西亚、菲律宾、新加坡、朝鲜、韩国、泰国)、南亚国家(印度、孟加拉国、巴基斯坦、斯里兰卡)、EEFSU区域（前苏联、东欧国家)、ALM(非洲、拉丁美洲)。此外，MARIA模型对区际间能量流



附图9　区域性的MARIA模型系统结构

动、食物生产简化与土地利用变化所进行的仿真模拟表征了生物量的潜在贡献。同时，碳吸收处理技术在模型中也加以考虑，而且用 Negishi 权重技术对国际性碳产品、能量资源、碳排放许可等贸易价格进行了评估。MARIA 模型的系统结构包括全球变暖、经济活动、能量、食物与土地利用等四个子系统，它们之间的互动关系及其内在机制可以用附图 9 进行表征。

2. 全球变暖子系统

资源与产业配置的多区域综合研究模型(MARIA)的全球变暖子系统是基于 Wigley 的 5 倍时间常量模型(five-time constant model)。它对全球碳的排放——密集机理进行了研究分析。此模拟研究中运用的两级水平热能储存模型是从气候经济动态综合模型(the dynamic integrated model of climate and economy, DICE 模型)中移植而来的(Wigley 1994，Nordhaus 1994)。目前，MARIA 模型的全球变暖子系统仅仅能够对全球碳排放量进行评估和测算。

3. 经济活动子系统

MARIA 模型的全球经济活动子系统模块的研究核心为：将由资本、劳动力、电力与非电力能源等四个动力因子所驱动的 CES 生产函数在前面所述的 8 个世界性区域中加以模拟运行。在其研究过程中利用 Negishi 权重技术将各个产业部门综合集成为一个动力因子，并在此基础上对其结果进行分析研究。在未来 GDP 增长的规划设计过程中，必须认真考虑由于外生因子与内生因子影响而产生的 GDP 潜在性增长速度。外生因子产生的影响可以用人口与人均 GDP 增长速率的乘积进行测定，而内生因子产生的影响则可用能源成本与价格来进行测定。

4. 能量流子系统

MARIA 模型的能量模块包括 3 种初级燃料能源(煤、天然气与石油)、生物能源、核能以及可再生能源技术（如水力水电、太阳能、风能与地热)等方面的模型驱动因子。在 MARIA 模型中，能量的需求包括工业、交通运输及其他公共设施。核燃料重复循环技术如果能用公式对其进行清楚表达，那么这种技术的实现将非常简单，但如何用公式对其进行表达却是很难的科学问题，碳吸收技术的实现同样如此。MARIA 模型能量子模型模拟运行产生了未来能源资源提取与利用的经典轮廓：21 世纪上半叶能源资源的利用主要以天然气为主，下半叶碳资源则将得到释放，而利用的能源资源主要为太阳能、核能及生物能等不含碳的资源和煤为主。虽然 MARIA 模型的设计目标是用于各种一致性选择方案的宏观尺度评估，而且研究单元内 SO_2 气体排放量、产业结构变化及城市化问题等详细信息在模型中都没有加以考虑，但是 MARIA 模型能够对各种燃料的比例变化与可能的能源贸易费用进行长期的模拟预测，从而提供能源燃料远景规划。

MARIA 模型中的能量成本包括能量生产与使用成本，而能量的市场价格又很大程度上是基于模型模拟计算的影子价格来进行确定的。在 MARIA 模型的众多参数中，化石燃料提炼成本系数与能源加工成本系数对模型模拟过程中的各种能源使用比率及其排放量起着相当的作用，其中能源加工成本系数基本上是从《全球能量 2100 远景规划》中提炼出来的(Manne and Richels 1992)。MARIA 模型最近的第 8 版本，在对燃料资源有效性的评估方面采用了 Rogner 的评估方法(Rogner 1997)，而且为了简化模型参数，在假定将二次生产函数内插到资源出现概率与提炼成本的关系函数中的情况下，把燃料资源及其储备类型综合为两个大类。模型中相应的参数可概括为附表 13。

附表 13　MARIA 模型中假定的累计性资源及其精炼成本

	煤		石油		天然气	
	等级 A-C	等级 D-E	等级 I-III	等级 IV-VIII	等级 I-III	等级 IV-VIII
全球资源出现概率	53	205	12	98	16	820
成本系数	0.2-2.8	2.8-6.3	<4.4	4.4-28.0	<4.4	4.4-25.4

注释：

(1) 模型中资源提炼成本按 1990US$/桶石油的等价物进行计算

(2) 煤资源中包括褐煤

(3) 等级 I-III 与等级 A-C 为传统资源，等级 I 与 A 被认为是可再生储量资源，等级 II 与 B 为附加的可再生储量资源，等级 III 与 C 为理论上可附加的储量资源

(4) 等级 IV 放大型可再生资源，等级 V-VIII 非传统型的储备资源，等级 VII-VIII 为附加型的概率出现资源，等级 D-E 为附加型资源

(5) 以上资料来源：详见 Rogner, 1997

5. 食物与土地利用子系统

为了估算生物能量对能源资源的潜在贡献，模型中引入了简单化的食物需求与土地利用的子系统。在此子系统中，人类对营养、热量及蛋白质需求量是一个人均收入函数，这些需求直接或间接地通过肉类食物、农作物食物与牲畜的饲养等途径来供给和实现。另外，森林不仅是生物量及木材产品的主要来源，而且也是对碳沉积函数进行测评的主要依据。

主要参考文献

Edmonds J, Wise M, MacCracken C. 1994. Advanced Energy Technologies and Climate Change: An Analysis Using the Global Change Assessment Model (GCAM). PNL-9798, UC-402. Pacific Northwest

Laboratory. Richland, WA 99352

Edmonds J, Wise M, Pitcher H, Richels R, Wigley T, MacCracken C. 1996a. An Integrated Assessment of Climate Change and the Accelerated Introduction of Advanced Energy Technologies: An Application of MiniCAM 1.0. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 1(4):311-339

Edmonds J, Wise M, Sands R, Brown R, Kheshg H. 1996b. Agriculture, Land-Use, and Commercial Biomass Energy: A Preliminary Integrated Analysis of the Potential Role of Biomass Energy for Reducing Future Greenhouse Related Emissions. PNNL-11155. Pacific Northwest National Laboratories, Washington, DC

http: www.nies.go.jp social aim

http: www.sut.ac.jp

附录F　气候与经济的动态综合模型(DICE)

1. 模型概述

美国William Nordhaus教授1992年从结合温室气体影响解释一些重要经济问题的研究中提出了气候与经济的动态综合模型(dynamic integrated model of climate and the economy, DICE)。由于它本身相对简单且比较透明，目前已经成为一个被广泛运用的国际综合评估模型。NICE模型是用一个相对复杂的经济模型将全球性与季节性两方面的气候模型耦合在一起形成气候与经济系统(Schneider and Thompson　1981)，从而相应地产生了气候与经济动态综合模型。此气候与经济系统模型是一个最大限度地减少消费量的效用最佳增长模拟模型，而这些消费量来自于所有规划周期内传统社会福利作用理想预测。DICE模型通过均衡减少气体的排放成本及其所产生的气候变化成本来对未来气体排放减少进行最优预测与规划，这一均衡过程表征为气候损害函数。

自DICE模型发展运行以后，众多的科研论文都在企图证明DICE模型对气候变化与消费结构变化之间的敏感性(Schultz and Kasting　1997，Roughgarden and Schneider　1999)。相关的论文在对气候与经济系统进行模拟时，他们通过在气候与经济动态综合模型中增加突发性、非线性等气候变化子模型，从而使大部分传统国际性综合评估模型普遍过于简单化这一问题得以缓解，但他们并没有将在许多更复杂的基本环流模型(GCM)中所发现的气候非线性变化趋势的可靠性模拟结论(Manabe and Stouffer　1999)与实际观测结果考虑进去(Broecker　1997)。最初的DICE气候模型仅仅能够用于平滑温度变化曲线，也就是使各个时间段气温变化的不连续曲线经过平滑处理而变成连续的变化曲线，从而提供CO_2平滑增长的模拟曲线。然而，当基本环流模型(GCM)在某种气体的平稳排放情景下强制对其变化进行模拟的时候，基本环流模型(GCM)才能够显示出突发性气候非线性变化的响应，尤其是像引起北欧温度上升近10℃的北大西洋海洋热循环(THC)的弱化或将要瓦解的环流之类的突发性非线性气候变化事件(Broecker　1997)。诸如此类在短短的一个世纪甚至更短时间内就能够导致气温增温速率快速变化的突发性非线性气候变化事件，将会引起区域性海洋表面温度的快速变化而不是全球平均气温的变化。甚至即使在全球变暖间隙期也会导致区域性气温的下降(Schneider and Thompson　2000)。相关的几次仿真模拟表明大气环流所产生的循环敏感于未来温室气体排放的稳定性水平和大气中CO_2浓度的增加速率(Stocker and Schmittner　1997)。Michael D. Mastrandrea等在论文《突发性气候变化综合评估》中，通过改进DICE模型将非线性气候变化事件行为及与其相关的海洋热环流(THC)的减少或瓦解等相关资料和条件综合到DICE模型中加以模拟分析，从而对非线性气候变化事件进行了探索性研究。

气候和经济的动态综合模型(DICE)研究的目的是企图通过使用现在经济学工具来获得一个有效解决全球变暖危机的方法。模型模拟运行所基于的假设为：人类只有在他们所获得利益超过其采取环境保护政策措施所必需的花费，并且环境管理标准还未达到增加管理所获得利益不超过增加管理所需费用的情况下，他们才会采取环境政策。在全球变暖的研究方面，以上假设很好证明，但却难以执行。DICE模型是一个没有区域划分的全球模型，其研究目的是对未来100年内为减少CO_2排放量所需费用进行预测，并提出全球性远景规划及其相应的战略措施与目标。但是DICE模型在其模拟运行的过程中并没有对由于燃料能源改变(譬如，燃料从煤到天然气或者是到太阳能等形式的能源的变化)而引起的CO_2排放量的变化及排放成本的变化进行考虑，所以在DICE模型的模拟过程中认为，CO_2排放量的减少仅仅通过能源的消耗或者是产品的生产就能够间接地加以定量分析。此外模型也没有对由于技术提高而导致能源利用效率的提高等技术性因素进行分析，所以模型模拟运行产生的结果就会具有一定的悲观性。

2. 模型组成与结构

DICE模型是一个全球经济最佳增长模拟模型，用它可以对减少温室气体排放量的不同政策选择方案进行评估。在DICE模型中，研究人员将世界作为一个单独的生产者与消费者身份，让其在人类消费量(通常用固定资产投资的增长速率来进行测度)与全球温室气体排放量的减少速率之间进行均衡决策

(Nordhaus 1992)。因此DICE模型既包括了经济的组成部分，也包括了气候变化的组成部分，并且模型中所指的全部温室气体包括了CO_2及其等价物的排放量。DICE模型的经济、经济与气候两个方面的重要研究变量被进一步引申发展为DICE模型相应的变异模型，即气候与经济的区域性综合模型(RICE)和气候与经济的随机性综合模型(PRICE)。RICE模型利用多区域资料来对世界经济进行模拟，而PRICE模型则包括了对气候与经济之间的不确定性进行更多的完全处理(complete treatment)。

作为DICE模型一个变异模型的RICE模型将全球划分为多个研究区域，而且RICE模型的结构方程与DICE模型中相应的方程相似。RICE模型开发研究的主要挑战性目标是构建能够准确地捕获研究区域内所有国家和地区中长期经济增长的特征及其变化规律。从气候变化综合评估模型所运用的纯理论、高度程式化模型的外部结构来看，并没有世界经济模型所必须采用的模型。而对于世界经济模型来说，其有用部分是从人口统计学家对人口进行远期规划的人口规划模型中获得的。尤其是对于美国和西欧地区，要不是一些相应的重要变量决定着关键性信息与技术的变化，它们将不得不重新构建近期人口规划模型。RICE模型的运行周期通常是10年,模型中主要的参变量因子有经济变量因子及其相关的气候变量因子两个方面。另外一个方面，PRICE模型虽然是DICE模型的变异模型,结构也与DICE模型的结构相似,但PRICE模型对世界不同情景的不确定性分析研究提供了更加复杂的分析处理方法。

3. 模型输入输出及公式表达

(1) 效用折扣目标函数

DICE模型作为一个模拟全球经济动态增长的最优化模型，它通过选择隶属于少数经济与地球物理约束限制的(消费、投资及气体排放控制)三个决定性变量因子并对其进行准确评估，从而使得DICE模型的模拟效用达到最大化。这一过程的目标函数可准确地表达为：

$$\max U=\sum_t \frac{P(t)\ln[C(t)/P(t)]}{(1+\rho)^t}$$

式中，U为折扣效用；$P(t)$为时间t时的人口数量；$C(t)$为时间t时的全球消费量；ρ为相应时间t时的社会比率。总之，效用函数也就是折扣比率为ρ时的人均消费函数，而$P(t)$值则是在假设24世纪世界人口水平稳定于106亿范围内的情况下所采用的一个外生变量。ρ同样作为外生因子，取值为3%。

(2) 全球产出量的Cobb-Douglas生产函数

$$Y(t)=\Omega(t)A(t)L(t)^{1-\gamma}K(t)^{\gamma}$$

式中，$A(t)$为技术贡献，是假定减少生产增量情况下的一个外生增量函数；$L(t)$为劳动量，假定它与$P(t)$的值相等；$K(t)$为投入资本；γ为资本的弹性系数，假定为0.25；$\Omega(t)$为表征控制气体排放成本与气候变化成本的生产函数，在后面将对其进行深入的论述。换句话说，全球产出量的Cobb-Douglas生产函数所表征含义为：在人口数量一定的情况下，随着生产力的提高，与之相对应的测量水准则相对降低。

全球产出量测度函数的外生变量划分为消费量和投资量两个部分，具体的计算方程为$Y(t)=C(t)+I(t)$，而投资对未来资本储量的响应水平函数为：$K(t)=(1-\delta_k)K(t-1)+I(t-1)$，$\delta_k$为资本储量的减少比率，其外部取值通常为0.10。因为模型所采用的时间增量周期是10年，所以t表示的是$t-1$时的10年后的时间。

(3) 气体排放量的输出函数

DICE模型中由于温室气体排放而引起的气候与经济的相互作用机理，可表征为下面的气体排放量输出函数：

$$E(t)=[1-\mu(t)]\sigma(t)Y(t)$$

式中，$\mu(t)$为温室气体排放的内部控制比率；$\sigma(t)$为未经过控制处理的单位CO_2等价物排放量。由于能源利用效率的提高及集约性碳燃料替代物的增加，$\sigma(t)$才作为一个减少函数在模型外部加以运用。

(4) 气候变化的依赖函数

气候变化量级的大小依赖于大气中温室气体含量$M(t)$，而并不是依赖于大气中气体的流动，如$E(t)$等。

$$M(t)-M_{\text{pre}}=\eta E(t-1)+(1-\delta_M)[M(t)-M_{\text{pre}}]$$

式中，M_{pre}为工业化以前的大气中温室气体含量；η为边际大气保持率；δ_M为深海的碳转化比率。模型假定如果在工业化以前大气中的温室气体含量M_{pre}为5900亿吨，那么每隔10年，边际大气保持率η与深海的碳转化比率δ_M的变化率则分别为0.64和0.0833。

(5) 地球表层辐射计算方程

随着大气中温室气体的聚集，地球表层的近地面辐射量将随之增加，它们之间的具体关系可用如下方程进行表达：

$$F(t)=4.1\{\lg[M(t)/590]/\lg 2\}+O(t)$$

式中，$F(t)$为辐射强度，采用地球表面每平方米内瓦特数来进行计算；$O(t)$是来自于其他温室气体(主要是CH_4与N_2O)的外部辐射强度

通过大气与海洋表面、深海之间的热量交换方程，可以对$F(t)$与全球表面平均气温增加量$\Delta T(t)$之间的关系加以定量分析研究。在所有的热量交换方程的运行过程中，假定如果CO_2含量增加一倍，则将导致平均气温上升3℃(这是一个众所周知的气候变化的敏感性数字)，相关的重要参变量均能够容易地组合到DICE模型当中。关于$F(t)$与$\Delta T(t)$之间互动关系的详细资料，请参阅1981年Schneider和Thompson的相关文献资料。

(6) 气候变化的损害方程

通过全球表面平均气温增加量$\Delta T(t)$，DICE模型的气候子模型将其模拟运行所产生的信息反馈给DICE模型的经济子模型，甚至可以把气温变化作为气候变化的响应指标。这一反馈过程可以用以下的气候变化损害方程来进行定量分析。

$$d(t) = \alpha_1 \Delta T(t)^{\alpha_2}$$

式中，$d(t)$为全球产出量损失分数；α_1与α_2的估计值分别为0.001 48和2。

(7) 控制气体排放成本的计算方程

虽然通过选择不同方式的温室气体排放内部控制比率$\mu(t)$可以使气温升高速率得以控制，并相应地减少气候变化所带来的损失量，但是必须对控制气体排放的成本进行预测计算。如果其成本超过气候变化所带来的损失量，这种方法也不具有很好的可行性。控制气体排放所必需的成本的计算方程为：

$$TC(t) = \beta_1 \mu(t)^{\beta_2}$$

式中，$TC(t)$均为全球产出量减少的损失分数；β_1与β_2的值分别为0.0686和2.887(采用Nordhaus所提供的参数值)。此方程的计算隐含了降低少量(10%)的气体排放量所需要的成本相对较低，而如果是控制大量气体排放其控制成本将会相当高(如减少50%的气体排放量所需的控制成本将达到全球产出量的1%)。虽然这些值还是些争议数据(Repetto and Austin 1997)，但是应用DICE模型最初模式的目的主要是研究政策选择方案对可选损害函数的灵敏性。

(8) 表征控制气体排放成本与气候变化成本的生产函数

将气候变化的损害方程与控制气体排放的成本计算方程进行综合，得出：

$$\Omega(t) = \frac{1 - TC(t)}{1 + d(t)}$$

如果只从方程本身来看，它似乎没有任何意义，因为$1/[1+d(t)]$在理论上仅只有$d(t)$的值非常小时才有可能逼近于$1-d(t)$，否则$\Omega(t)$将不可能完全捕获到$d(t)$条件下的损失。但是，在这里运用DICE模型最初模式的真正目的是对损害函数不确定性结果进行分析，以及对定量分析不确定性因素的表征方法进行研究探讨，因此Tim Roughgarden等人在研究中并没有更改$\Omega(t)$方程的基本形式。

从以上DICE模型的各个输入输出方程与表征函数，可以看出DICE模型将经济与气候变化两个不同的研究方面，完全地、紧密地结合在一起，对全球气候变化与世界经济变化动态地进行综合的模拟预测分析有其重要的意义。

主要参考文献

Azar C, Sterner T. 1996. Discounting and Distributional Considerations in the Context of Global Warming. Ecol Economics 19, 169~185

Michael D M, Stephen H. 2001. Integrated Assessment of Abrupt Climatic Changes. Climate Policy 1 433~449

William D N. 1992.An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases. Science. Vol258. 20 1315~1319

http://sedac.ciesin.org/mva iamcc.tg/TGsec4-2-15.html

附录G 亚太综合模型(AIM)

1. 模型概述

由于全球气候的变暖对亚太地区的社会经济将会产生重大影响，而采取防止全球气候变暖的对策，同样会使亚太地区承担很大的经济压力，但如果是不采取任何减少气体排放量措施，估计到下世纪温室气体的排放会增加到全球排放的一半，它所引起的气候变化将会直接影响着整个亚太地区环境、经济、社会的可持续发展。为了对上述问题进行研究分析，日本国家环境研究所、日本京都大学及亚太地区几个相关的研究机构共同研发了一个大型计算机仿真模型，即亚太综合模型(the asian pacific integrated model, AIM)。AIM 模型以减少温室气体排放量与避免气候变化所产生的影响为目标，对稳定全球(尤其是亚太地区)气候变化的政策方案进行评估分析。

由于温室气体排放量的增加而导致大气中 CO_2 含量的增加，并进一步引起气候变化，从而给社会经济的发展带来严重与长期的影响。要对这一问题的内在机制进行研究分析，并对其进行定量且动态的模拟，就必须在科研人员、机构及研究区域政策决策者之间建立相互交流与评估的工具手段。当然这里的工具手段肯定应该是一种极为综合、有效、可靠的科研手段或科研方法。而亚太综合模型(AIM)的核心任务和最终目标就是对以上问题进行动态的仿真模拟分析，并为政策决策者提供正确的决策支持手段，从而为如何解决全球气候变暖对亚太地区社会经济产生的重大影响问题提供帮助。

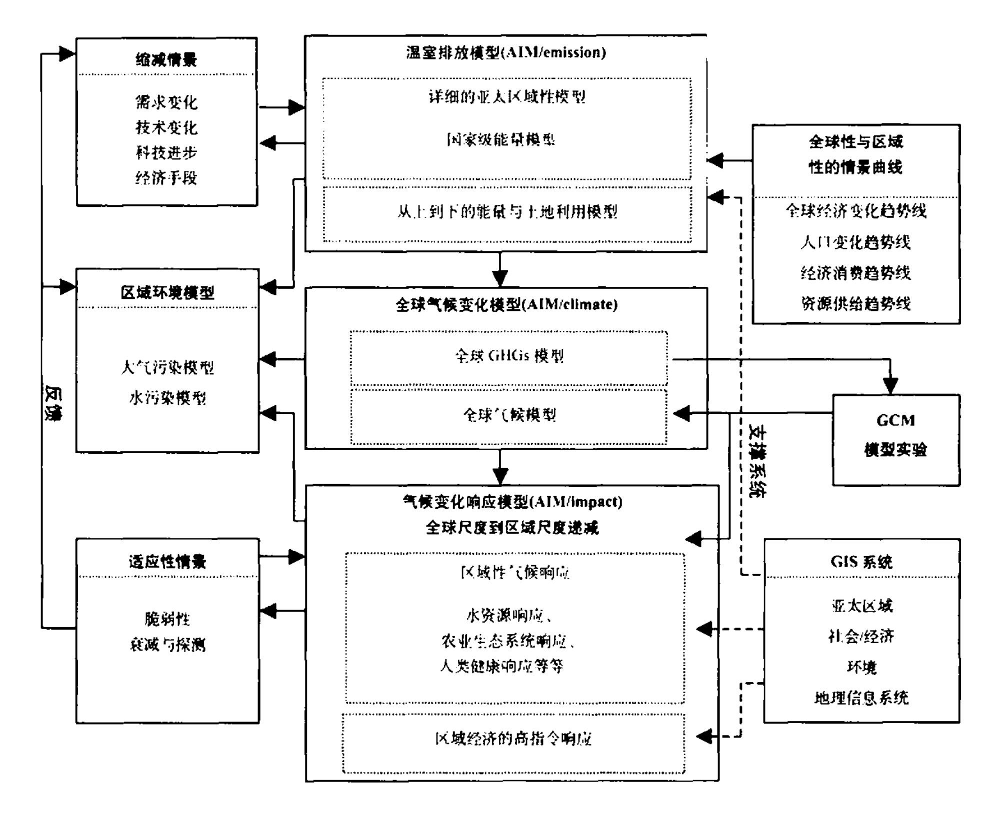
AIM 模型的一系列研究为国家、区域及全球性级别的政策方针的商议均做了主要贡献。目前，AIM 模型已经向 IPCC 组织提供全球及区域气体排放情景和提供气候变化区域性响应的评估报告，而且 AIM 模型关于气体排放的远景预测及其响应评估的国际性对比研究已经在斯坦福能量建模论坛上通过了测试评估。另外对亚洲环境管理委员会(Eco Asia)的管理决策、UNEP 组织的全球环境远景规划、UN 全球建模论坛及亚太网络规划等也做出了重要贡献。

2. 模型组成及其系统结构

AIM 模型包括三个主要的模块，即温室气体排放模型(AIM/emission)、全球气候变化模型(AIM/climate)与气候变化响应模型(AIM/impact)。其中，AIM/emission 模型用于温室气体排放量的测算，并对减少温室气体排放量的可选择性政策方案进行评估；AIM/climate 模型用于大气中温室气体浓度的预测，并对全球平均气温上升进行测算；而 AIM/impact 模型则是用于测度气候变化对亚太地区自然环境与社会经济的影响，并加以评估分析。AIM/emission 模型、AIM/climate 模型与 AIM/impact 模型之间的互动机制及内在关系可以用附图 10 进行表征和阐述。

从 AIM 模型的系统结构图中可以看出，AIM/emission 模型包括国家级别的自下而上与自上而下能量模型，以及全球性级别的土地利用模型，而且人口增长与经济发展趋势同政策战略措施一样均被假定为全球或区域性变量，在模型中加以运用。区域性或国家级别的模型通过各个变量相互作用的模拟运行，对能量消耗、土地利用变化等进行评估测算，同时对 GHG 气体排放量进行预测。SO_2、NO_x 和 SPM 气体的排放量在 AIM/emission 模型中加以计算，并将其输入 AIM/climate 模型与区域性环境模型之中，其目的在于加强地方性大气污染问题相互影响的研究工作。除 CO_2、GHG_s 等排入大气后能够逐步地发生化学反应之外的其他排放气体在 AIM/climate 模型中进行计算，而海洋对 CO_2 及其热量的吸收则通过上涌-扩散模型(upwelling-diffusion model, UD)加以计算，UD 模型将海水层面分为海洋表面混合层与中间过渡层两个层面，其中的中间过渡层可延伸到海水表面 1000m 的地方。

能量平衡/上涌-扩散海洋模型(energy balance/upwelling-diffusion ocean model)可用来对全球平均气温变化进行测算，其输出结果作为区域性模型的输入变量。模型中利用 GCM 实验的数据资料，目的在于对气候参数的区域分布进行评估，并将模型运行结果与 AIM/climate 模型测算的全球平均气温变化进行耦合分析。在运行 AIM/impact 模型对全球与区域性气候响应的计算过程中，运用了内插气候分布数据。AIM/impact 模型主要处理的是气候变化对水资源供给、农业、林业产品与人类健康等一系列初级产品行业所产生的影响。另外，也用于评估气候变化对区域



附图10 AIM 模型的系统结构

经济所产生的高度影响。附图11表征了AIM/impact模型各个子模型之间的相互关系。

区域性的环境与社会经济数据被加以收集，并转化为地理信息系统(GIS)文件加以存储。AIM模型根据所收集的基础数据资料对由于全球变暖而引起的水资源变化、植被变化、疾病传播等进行模拟评估，最终以一系列的模拟运行结果与最初收集的资料数据作为源数据，构建相应的数据库。模型所运行的资料数据的分辨率一般以国家或省为单元。

(1) AIM/emission 模型

AIM/emission 模型包括国家级别的自下而上能量模型与全球级别的自上而下能量模型(详见附图12)。在自下而上能量模型中，能量需求通过能量浮动功能与能量效用因子的乘积进行计算，而其中的能量效用因子则是在依靠对R&D、新能源技术传播及能源价格的假定基础之上通过能量效用子模型加以计算的。能量需求可以看做是人类社会经济活动的一个函数。虽然自下而上模型能够对微观的人类活动行为与能量消耗进行表征和阐述，然而国家之间的活动行为及能量供给条件的宏观平衡条件却很难加以考虑。全球级别的自上而下能量模型正是为了弥补国家级别自下而上能量模型的这一缺陷而发展起来的，它是一个为了解决区域间及全球性能量市场的能量需求与供给平衡问题的能量-经济模型。除考虑能量消耗以外，全球自上而下能量模型中还考虑了GHG气体排放行为。为计算来自于土地利用变化的GHG气体排放量而研发的全球土地利用模型，可以用来描述土地利用变化与生物能量生产之间的相互关系。

(2) AIM/climate 模型

为了研究海水对CO_2及其热量吸收过程，以及描述海平面的上升，好几种类型的简单化气候模型得到了研究和发展，这些模型的基础结构是公共的、可选择的子模块化公式。AIM/climate 模型的基本结构如附图13所示。

AIM/emission 模型计算的GHG排放量被放到表征大气且按半球纬度划分的一个或几个模拟黑箱中进行研究分析。在研究分析过程中假设二氧化物不会自身衰减，但可能被海洋与陆地生态系统所吸收。海洋对二氧化物的吸收通过简单的上涌-扩散模型或OGCM实验的卷积相似模型进行计算。在Yuzuru MATSUOKA 等人的模型中，假设影响净初级生产力的二氧化碳肥力效应与温度效应是由于碳循环过程中

的损失性下沉作用而产生的，而关于初级影响与 β 系数的假定是为了保证全球碳平衡，至于其他 GHG 的自身衰减过程在其第一反应过程中便可以加以模拟计算，而模拟方程中的动力系数则通过复杂的输出量之间的对比分析来进行矫正，而不是利用模型来实现。

辐射强度因子 ΔQ 与半球陆地/海洋气温上升之间的关系可用能量平衡/上涌-扩散(EB/UD)海洋模型进行公式化的定量研究。引起海平面上升的海水扩张通常归因于全球平均气温的升高、大陆冰川的融化以及南极洲与格陵兰岛冰盖的变化。如果要对未来的气候变化进行研究，那么对未来气候变化的空间数据的预测就是必然的。所以，在考虑未来气候空间分布时，应该综合运用大气环流模型(GCM)对各种气候变化的模拟输出结果。

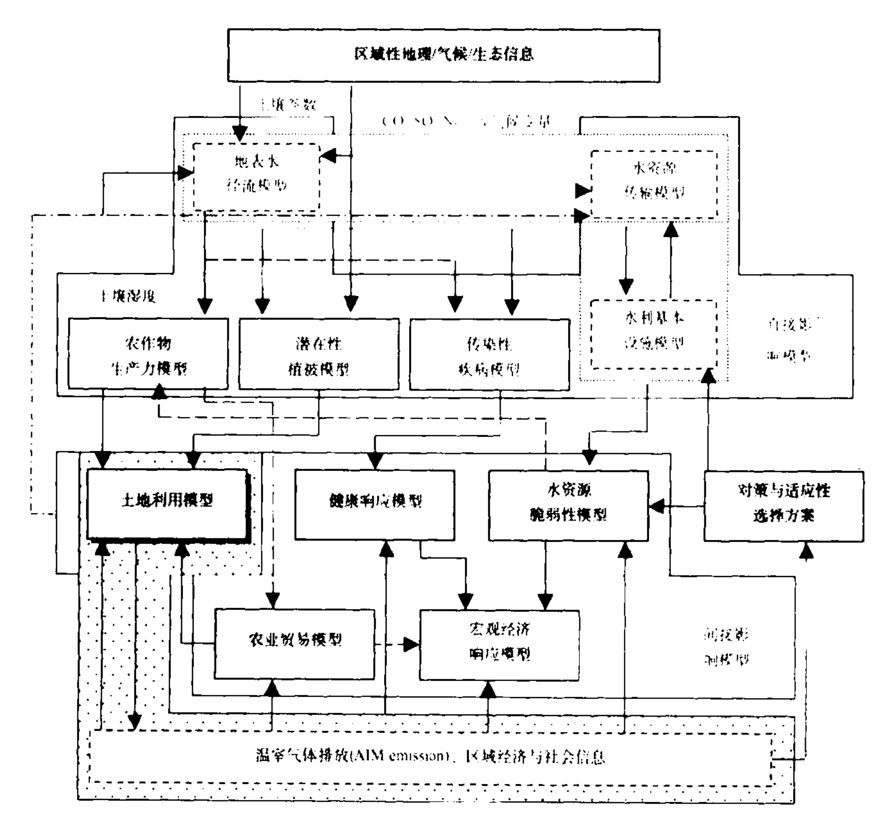
(3) AIM/impact 模型

气候变化直接或潜在地影响着水资源、农产品、自然生态系统与人类健康。尽管我们不认为气候变化与社会经济发展是因果互动关系，但实际上在全球性的贸易及移民过程中已经采取了修正这些直接影响的大量措施。根据气候变化的影响包括直接影响和潜在影响两个方面，我们在研究的过程中也应该采用相应的研究方法，即把对气候变化所产生的影响研究分为直接研究和间接研究两个阶段。AIM/impact 模型中的两个模块类型刚好符合以上研究思路。

AIM/impact 模型中包括了四个用于研究气候变化直接影响分析模型，它们分别是海洋表面水流/传输模型(surface water runoff/transport model)、农作物生产力模型(crop productivity model)、植被模型(vegetation model)及传染病扩散模型(infectious disease model)。对以上直接影响分析模型进行组合与连接，就可形成相应间接影响分析模型。比如，评价气候变化直接影响所引起的社会经济连锁作用的国家级世界农业贸易模型与宏观经济模型，就是通过以上直接影响分析模型的连接而得(详细情况参阅附图 11)。

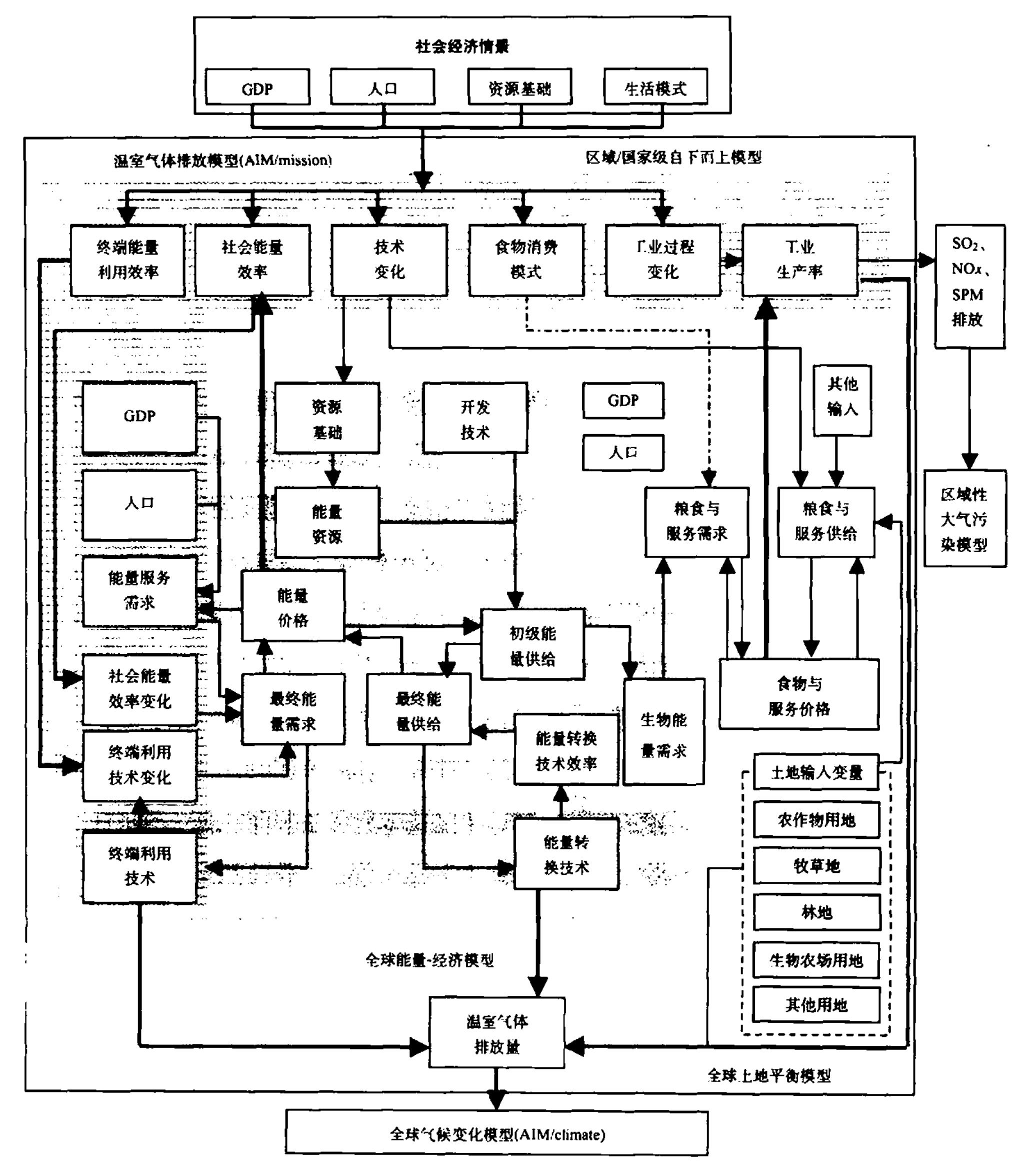
3. 模型特征

AIM 模型目前已经成为国际综合评估模型(IAM)中的核心模型之一，它的发展研究，为亚太地区气候



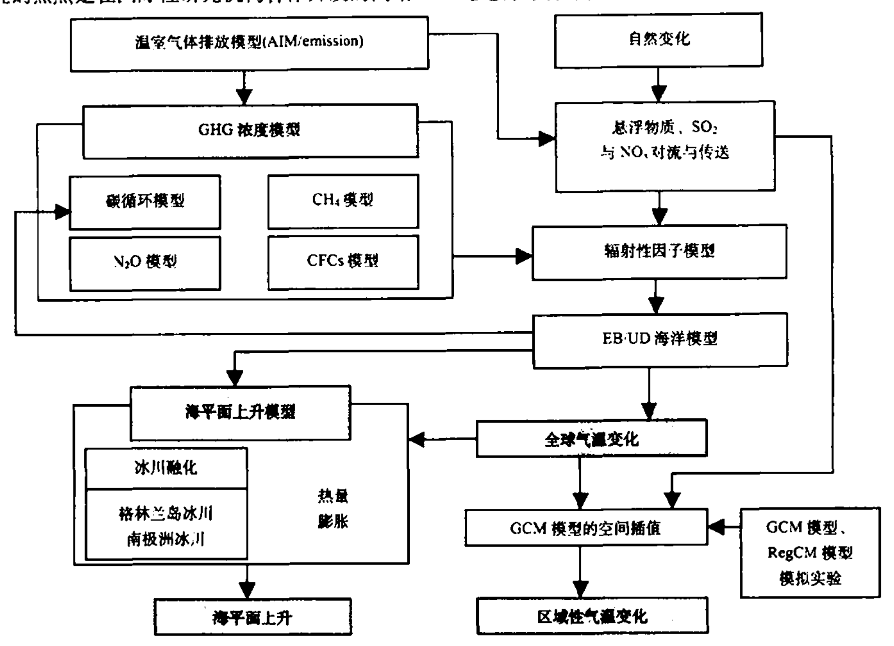
附图 11　AIM/impact 模型的系统结构

变化及社会经济发展的综合评估提供了有力的理论依据和评估模式。因为AIM模型是一个对区域甚至是全球的气候变化与社会经济发展进行评估的大型计算机仿真模型，所以在模型对气候变化与社会经济发展进行模拟运行和综合评价分析的过程中，具有自己的特征，它们主要表现在以下几个方面：① 将气体排放模型、气候变化模型与气候响应模型综合集成于一体，对其内在的互动机制进行评价；② AIM 模型的综合评估过程中既准备了用于州与国家级的综合评估模块，也准备了用于保证各个子模型之间一致性的全球综合评估模块；③ AIM 模型由自下而上的国家级综合评估模块与自上而下的全球综合评估模块综合构成；④ AIM 模型核心目的是用来确定政策的可选择性方案；⑤ AIM 模型包括一个用于对技术进步所产生的响应进行综合评估的非常详细的技术选择模块；⑥ AIM 模型利用地理信息系统详细的信息数据来对



附图 12 AIM/emission 模型的系统结构

区域尺度气候响应分布进行综合评估和表征；⑦AIM模型研究的焦点是在国际性研究机构合作开发的网络技术及其资料的基础上，对亚太地区气候变化及其响应进行综合评估研究。



附图13 AIM/climate模型的系统结构

主要参考文献

AIM Project Team. 1997. Long-term CO_2 Emission Outlook in Japan. AIM Interim Paper, IP-97-03, NIES, Tsukuba.

Kainuma M, Matsuoka Y, Morita T. 1998. Analysis of Post-Kyoto Scenarios: the AIM Model, EMF Workshop on Climate Change Impacts and Integrated Assessment, Snowmass,Colorado

Matsuoka Y, Morita T, Kainuma M. 2001. Integrated Assessment Model of Climate Change: The AIM Approach. In: Matsuno T, Kida H(eds.). Present and Future of Modeling Global Environmental Change: Toward Integrated Modeling, pp. 339~361.© by TERRAPUB

http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/150.htm

http://www.grida.no/climate/ipcc/index.htm

附录H GHG排放减少政策对区域及全球影响的评估模型(MERGE)

1. 模型概述

GHG排放减少政策对区域及全球影响的评估模型(MERGE)是在电力研究机构支撑下发展起来的一个按区域进行分解的综合评估模型，它是在全球五个世界性区域2200年远景规划的动态一般均衡模型基础之上建立起来的。这五个世界性区域的每一个区域都具有其单独的存储与消费决策权。作为表征大气中CO_2、CH_4与N_2O生命周期的简单型气候模型，它隶属于辐射加强及全球平均气温变化均衡等全球变化关键性因子导致的全球变化过程。其阐述性影响方程根据组成部分属于市场因子还是非市场因子而分别对其进行单个定义。市场影响通过实现温度变化的二次函数来进行模拟，并采用与Nordhaus评估保持一致的判别点评估对其进行校准，而非市场影响则看做全世界的公共利益来进行模拟分析。每一个区域为了避免限定温度变化而自愿支付的费用可用区域性收益的S形函数来进行表达(Manne et al. 1993)。

MERGE模型基于Excel版本的简化形式称为MiniMERGE，它是EPRI研究所最近开发出来的，允许在单一的运行环境中对可选择的区域间负担均分计划进行测试评估。MiniMERGE允许用户对折扣比率的两种方案进行选择，并可以选择政府指定的全球气体排放目标的四种标准之一进行运行分析。这四种气体排放标准分别为：商业运行的一般模式、1990年的稳定性排放标准、稳定CO_2浓度在550×10^{-6}以内、使当前损失最小化的最优排放模式。在以上这些条件下，相应的用户就可以通过对匹配于人均许可排放量的全球气体排放转化配置速度进行假设，从而对指定区域为控制气体排放所需成本进行测算(Manne and Richels 1995)。以上MERGE模型中所涉及的每一个模型都具有可操作性和有效性。

科学技术的进步是人类解决全球变化问题的关键因素，尤其是在能量系统的研究中显得更为突出。因为利用科技技术可以使人类利用更加洁净的能量资源和运用能量高效使用技术，从而大大减少人为造成的温室气体(GHG)排放。在以前对减少温室气体(GHG)排放的研究中，有许多对温室气体(GHG)排放进行模拟分析并采用相应政策进行控制的能量系统模型。譬如，POLES模型(Criqui et al. 1996)、PRIMES模型(European Commission 1995)、MARKAL (Fishbone and Abilock 1981)等被用于控制温室气体(GHG)排放的政策分析与研究当中，并把技术的进步当做是来自于天神的人类力量来加以对待。实际上，他们在研究如何减少或控制温室气体(GHG)排放的过程中，却把技术进步作为外界时间趋势模式。例如，在如何利用能量技术方面，他们通过提高诸如投资成本之类的外在的随时间变化而变化的经济特征来加以考虑和运用。而由Manne等人提出并开发研制的MERGE模型，作为经济评估与技术选择的一个很好的计算机模拟工具，则可以用来对上述相关的全球气候变化问题进行模拟运行及分析处理。

在利用MERGE模型对全球的GHG排放减少政策等进行模拟分析时，它将全球划分为以下9个地缘政治区域：加拿大、澳大利亚与新西兰(CANZ)、中国、东欧和前苏联(EEFSU)、印度、日本、墨西哥和OPEC(MOPEC)、欧洲经济合作与发展组织(OECDE)、美国及其他剩余区域(ROW)。

2. 模型的组成机理

虽然MERGE模型被当做经济评估与技术选择的一个很好的计算机模拟工具来对全球气候变化问题进行模拟运行及分析处理，但到目前为止，它仍然仅仅从外因方面来考虑技术进步问题。Olivier Bahn与Socratès Kypreos在2002年7月的MERGE-ETL报告中将技术变化的内生变量因子的表示方法融入了MERGE模型之中。在MERGE模型中就如何处理电力资源与非电力资源的技术变化问题，引入了单因子和双因子学习曲线等两种不同的运算模式来对能量系统中技术进步的动力机制的内部因素进行分析研究。

内生技术变化与收益增长相关联，其数学表达公式与MERGE-ETL相一致，均可看做非线性、非凸面的优化问题。也正因为如此，商业决策MINOS的传统方法并没有只依赖于MERGE-ETL的全球优化模型

(Murtagh et al.　1995)，而是在某一个区域进行实验研究。在MERGE模型中，ETA-MACRO模型描述了前面所划分的每一个区域，而ETA与MACRO则作为更低一级的子模型对研究对象进行详细的研究分析。

ETA模型是一个自下而上的工程性模型，它用来描述给定区域的能量供给部门因子，尤其对化石燃料、合成燃料、再生燃料等非电力能量的生产和电力生产进行详细描述与表征。ETA模型根据CO_2的减少目标来模拟及捕获各种能源替代方式与能源开发利用技术。

MACRO模型则是一个自上而下的宏观经济增长模型，它用于均衡给定区域内使用替代产品功能的嵌套不变弹性系数的经济部门之外的其他经济部门的经济发展状态，并对能量系统与相应经济部门的宏观经济反馈信息进行捕获。譬如，MACRO模型对高能量价格与相关经济活动的相互影响信息的捕获就是很好的例子。ETA-MACRO的数学公式完全可看做是凸非线性优化问题来加以描述，模型中的经济均衡问题由单优化模型决定，而且福利函数可以更好地用给定区域消费对数所表示的现行净价值来加以定义。在ETA-MACRO模型的模拟运行过程中，对特定区域能量资源富裕程度的考虑，应该包括化石燃料的初始储备量、核能资源、可再生资源及CO_2的许可排放量等几个方面。

MERGE模型对每个区域的ETA-MACRO子模型进行关联，利用适当的Negishi权重值(Negishi　1972)将一系列的区域福利函数综合集成为一个全球福利函数。如果运用石油、天然气、合成燃料、CO_2的许可排放量、合资产品('numéraire' good)等产品的国际贸易所表征的其他一切非能量贸易产品将这些区域性子模型进行更深层次的关联，关联综合形成的全球约束准则将能够保证所有能源商品国际贸易的供需均衡。

3. MERGE 模型内生技术的单因子学习曲线函数

在单因子学习曲线函数中，用累计总产量来表征知识积累量对一定技术条件下具体投资成本的影响。

(1) 假设$CC_{k,t}$是技术条件的内生因子，假定为k、周期为t的累计总产量，那么对于一个发电厂k来说，电力生产函数可表达如下：

$$CC_{k,t} = CC_{k,0} + \frac{\sum_{\text{regions},\tau}^{\tau\in[1,t]} 10 \times PE_{k,r,\tau}}{life_k \cdot lf_k \cdot 0.008\ 76}$$

式中，$CC_{k,0}$为初始阶段的累计总产量；$PE_{k,r,\tau}$为特定区域r的年均发电量；$life_k$为一年内发电厂k的发电时间；f_k为发电厂相应的负担因子；8760为每年的发电小时数。此电力生产函数是一个近似计算函数。

(2) 根据每年生产投资的多少对生产具有重要的影响，可以运用模型来对累计总产量进行更准确的计算(Kypreos and Bahn　2002)。引入非电力能量生产技术因子k后的电力生产函数为：

$$CC_{k,t} = CC_{k,0} + \frac{\sum_{\text{regions},\tau}^{\tau\in[1,t]} 10 \cdot PE_{k,r,\tau}}{life_k}$$

式中，$PE_{k,r,\tau}$为特定区域r内的年均非电力能量。

(3) 平均生产电能1GW或平均生产非电力能量1EJ所需成本的学习曲线函数：

$$SC_{k,t} = a \cdot CC_{k,t}^{-b}$$

式中，a为学习曲线初始点($SC_{k,0}, CC_{k,0}$)的给定参数；b为相应的学习指数。

(4) 学习指数b与学习速率pr的关系函数：

$$pr = 2^{-b}$$

(5) 总累计生产成本TC的曲线函数：

$$TC_{k,t} = \int_0^{CC} SC_{k,t} \mathrm{d}CC = \frac{a}{1-b} \cdot CC_{k,t}^{1-b}$$

(6) 周期t内的投资成本IC的计算方程：

$$IC_{k,t} = TC_{k,t} - TC_{k,t-1} = \frac{a}{1-b} \cdot \left(CC_{k,t}^{1-b} - CC_{k,t-1}^{1-b}\right)$$

(7) MERGE模型的能量生产成本的优化函数：

$$PC_{k,t} = a_k \cdot CC_{k,t}^{-b} + (1 - fr_k)PC_{k,0}$$

式中，$a_k = \dfrac{fr_k \cdot PC_{k,t_0}}{CC_{k,t_0}^{-b}}$。

4. MERGE 模型内生技术的双因子学习曲线函数

在单因子学习曲线函数中没有考虑私人对研究及发展所支付经费(R&D)，而在MERGE模型内生技术的双因子学习曲线函数中被作为一个重要的因子来加以考虑，尤其是在新能源、清洁能源及能源的高效利用技术等方面私人所支付的费用。

(1) 在技术k条件下的特定生产成本学习曲线函数：

$$SC_{k,t} = a_k \cdot CC_{k,t}^{-b} \cdot CRD_{k,t}^{-c}$$

式中，$CRD_{k,t}^{-c}$ 为周期 t 内研究与发展(R&D) 累计经费；a 为学习曲线初始条件($SC_{k,0}$、$CC_{k,0}$、$CRD_{k,0}$)的给定参数；b 为发展过程的学习指数；c 为研究过程的学习指数

(2) 在技术条件为 k、周期为 t 的研究与发展(R&D) 累计经费的计算方程：

$$CRD_{k,t} = CRD_{k,0} + \sum_{t=1}^{t}\left(\Delta_t \cdot ARD_{k,t}\right)$$

式中，Δ_t 为每一周期所包括的年数；$ARD_{k,t}$ 为每年外部因素具体支付的研究与发展(R&D) 经费。

(3) 双因子条件下的累计生产成本函数：

$$TC_{k,t} = \int_0^{CC} SC_{k,t}(CC,CRD)\cdot \mathrm{d}CC = \frac{a}{1-b}\cdot CC_{k,t}^{1-b}\cdot CRD_{k,t}^{-c}$$

式中变量含义同上。

(4) 双因子条件下周期 t 内的投资成本 IC 的计算方程：

$$IC_{k,t} = TC_{k,t} - TC_{k,t-1} = \frac{a}{1-b}\left(CC_{k,t}^{1-b}\cdot CRD_{k,t}^{-c} - CC_{k,t-1}^{1-b}\cdot CRD_{k,t-1}^{-c}\right)$$

式中变量含义同上。

(5) 综合以上单因子与双因子的各个学习函数，可将原始的MERGE模型的市场渗透约束方程更新为以下表达式：

$$EP_{k,r,t} \leqslant sf\cdot ED_{r,t} + exr_k^{10}\cdot EP_{k,r,t-1} + gdf_k\cdot \sum_{s\in regions} exr_k^{10}\cdot EP_{k,s,t-1}$$

式中，$EP_{k,r,t}$ 为区域 r 的年均能量生产量；sf 为低种子参数值；$ED_{r,t}$ 为区域 r 的年均能量需求量；exr_k 为每年的扩张比率；gdf_k 为反映区域超负荷影响的全球扩散因子。

主要参考文献

Bahn O, Kypreos S. 2002. MERGE-ETL: An Optimization Equilibrium Model with Two Different Endogenous Technological Learning formulations. NCCR-WP4 Working Paper 9

Barreto L. 2001. Technological Learning in Energy Optimisation Models and Deployment of Emerging Technologies. PhD Dissertation No 14151. Swiss Federal Institute of Technology. Zurich.

Barreto L, Kypreos S. 2000. A Post-Kyoto Analysis with the ERIS Model Prototype. Int. J. Global Energy Issues. 14: 262-280

Barreto L and Kypreos S. 1999. Technological Learning in Energy Models Experience and Scenario Analysis with MARKAL and the ERIS Model Prototype. PSI Report No 99-08. Paul Scherrer Institute. Villigen

Capros C, Mantzos L. 2000. Endogenous Learning in European Post-Kyoto Scenarios: Results From Applying the Market Equilibrium. Mode PRIMES. Int. J. Global Energy Issues. 14: 249-261

http: www.grida.no climate ipcc index.htm

附录I 全球大气环流综合评估模型(GCM)

1. 模型概述

全球大气环流综合评估模型(general circulation model, GCM)是所有气候模型中最为复杂的模型。GCM模型是基于动能与能量守恒、物质连续性及大气层气体状态平衡等基本规律来模拟复杂的大气动态变化的综合模型。GCM模型广泛应用于气候预测，但由于模型的维数极其庞大，所以不适合于定量评估。

GCM模型使用半球坐标系统将地球表面分割为经纬度栅格，例如4°×5°或445km×556km最为常用。由于难以估计边界条件，等压或标准化等压(σ)坐标系统被用于替代纬度坐标。大气层通常被分为7或9层。简单的计算得到地球表面的栅格数为：

$$(180/4)\times(360/5)=3240$$

7层大气模型的三维栅格数为：

$$3240\times 7=22\,680$$

时间差分计划通常用于简化偏微分方程对于限定三维的差分方程。典型的每一个三维栅格至少有4个状态变量：沿x和y方向上的水平速率、温度和水蒸气混合比率，并且每一层有一个状态变量和有很多诸如湿度与气压的输出和反馈变量。在一个具有代表性的GCM模型中，所有状态变量的数量是$22\,680\times 4+3240\times 1=93\,960$个。为了数值稳定和系统常量守恒，通常用于模拟每日的时间步长是15min。

GCM模型在其每一个时间步长内，有超过93 000个的状态变量需要被整合或评估，这体现出了大气模型的重要特点。海洋、岩石圈、低温层、生物量、人类活动排放动态、大气迹量气体浓度分布动态及其各种子系统之间的相互作用在模型中都必须完整包括，但这样会导致模型规模的增加，因此用户更喜欢使用超级计算机来完成庞大的处理工作。所以可以使用GCM模型来测试当前超级计算机的运算能力。如同Bretherton所说：“一个复杂的气候模型会不断挑战未来20年的大多数强大的计算机”。

全球许多研究组织已经构造了基于不同复杂程度的全球环流数值模型。这些模型用于模拟预定的时间和科学计划。目前使用的所有定量化气候预测模型尚没有同时包括详细描述海量数据的大气动态、大气化学成分、海洋动态和海洋化学。我们所知道的模型中还没有一个能满意地考虑所有大气、海洋和生物量之间的相互作用，这些限制性困难多少跟计算机有限的运算能力有关。在某一时刻的逻辑运动方向不可避免地掺杂次一级系统的相互作用，目前已经有许多研究组织使用这种方法在大气与海洋模型模拟运行中进行试验。另外，生物作用过程及其生态系统组织化行为还没有适合的方法模拟，主要是由于生命组织模拟的实质性困难，以及在以前尚未确定的CO_2库。

目前所构建各种GCM模型都存在大量的不确定性，这对于进一步改进代表性子系统和目前对于云团、海洋化学、岩石圈、生物量等各种气候系统间相互作用的理解有重要意义。已进行的CO_2和其他迹量气体认识的不确定性研究工作，对于各种研究计划也是十分有益的。GISS (goddard institute of space studies)、GFDL、NCNR对三个GCM模型的对比分析有较为详细的研究。Cess等对14个GCM模型的研究得出了相应的研究结论：对于各种对立的预测可归咎于对云团的不同模拟，因而对于季节性和区域性的模拟结果不适合于政府在经济、生态、农业、工业和社会效应预测等方面作为决策依据和计划制定根据。

一个更为详细精确的地球气候系统GCM模型应该包括所有重要的子系统：大气、土地、海洋、岩石圈、生物量、火山爆发以及它们之间的相互作用。

2. 模型的动态系统结构

一个GCM模型代表气候系统的一部分M，M可用它的空间边界B来精确界定，通常这个边界有浸透性的通量物质、穿过冲量、能量的特定边界条件。

在边界B内用于描述地球-大气系统部分不同内部状态的相关动态物理变量叫做状态变量，用向量X来进行表示。描述影响系统所有的外部条件，即边界条件，被认为是一个控制变量$U_t=U(t)$，这种外部控制因素需要界定为在时间t内决定未来系统M的不同演化。控制系统演化的过程方程为F，它是一个连续数值模型，通过选择适合的变量和方程来代表气候-地球系统的物理规律，可用以下方程表示：

$$\frac{\partial \chi}{\partial t}=F(\chi,U_t)$$

驱动数值模型可描述为：

$$X_{p+1}=F(X_p,U_p)$$

式中，向量 $X_p=X(t_p)$，代表所有满足决定模型内部状态预示变量实数的一个 N 维向量，N 是模型的自由度；状态向量 X 可代表每一栅格单元的物理变量。

以上公式所代表的是一种在 N 维向量状态空间 X(也称为阶段空间)中的"迭代图示"法。一次迭代代表大气状态在时间 t_p 的状态 X 转变到 $t_p+\delta t$ 时新的状态 X_{p+1} 的一次时间步长，δt 是步长。众所周知，时间步长是不能随意选择的，它受到随着空间尺度的增加而越来越小的限制。状态向量 X_p 的连续变化产生位置空间称为一个状态空间的轨道。

当外部条件固定的时候，控制向量 U 主要依赖于时间与自主性映射。一旦给定一个开始迭代的初始位置 X_0，则以后所有时间的轨道 X 就完全确定了。使用每天的日照百分率和固定的地表状态来对模型进行运行分析，这种理想化模拟有时称之为永久月模拟(通常为 1 月或 6 月)。对于这样一个自主系统，初始运行点 X_0 的选择与模型参数的设定就确定了整个系统的演化过程及其数理特征。

3. GCM 模型初始条件

轨道在有限子集阶段空间的吸引作用，被叫做动态系统的吸引器或吸引子。在一个系统中的多个吸引子和阶段空间可分为吸引域，吸引域的划分决定于给定初始点的轨道汇聚方式。已经存在的多吸引子，使得初始条件的选择无足轻重。尽管初始条件通常远离于所提供的较为平滑起点的吸引子，但模型吸引子的定位不是最初就知道的，也不能从邻近点进行确定。

对于一个大气状态的观测研究机构来说，观测大气状态一个比较好的方法是从模型吸引子开始结束邻近点的搜索及从邻近点开始搜索。这种方法对于天气数值预测、与大气观测常参考的观测资料插值适合方法的选择是密不可分的。复杂的插值方法需考虑更多时空数值结构观测的优化。对于动态模型公式来说，不同的观测场是独立并可能是非平衡的，并有可能导致最初迭代难以预测的波动性。

将模型状态构造为低维子集是从一个较为平衡的状态发展起来的初始化方法。尽管采取各种尽可能的努力去使用相对完善的观测数据来进行模型初始状态的确定，但使用实际大气状态在气候模拟初始条件最佳选择方法上还是不明显。只要两个吸引子不完全相同，初始部分的轨道就会一直在模型吸引子的范围之外，并且主要受到短暂与不稳定的动态吸引的影响，而不是受到自然的、长期的、固定的动态控制吸引子自身的影响。

4. 模型参数与边界条件

在控制变量中，U_t 代表 M 维向量，作为固定参数方便起见，重要的物理参数可列入其中。理论上，在今后的研究过程中，可能会得到精确的确定，在实际中却不是如此。有些环境变量(如地球自转速率、轨道参数、地球表面地势起伏及其海平面等)实际上均是缓慢变化的，但是在 GCM 模型模拟运行的过程中，对于如此长的时间尺度来说，可以将它们看做固定的值，而在模拟过去的气候状况时则需要进行调整。其他参数也不是在每一时刻都总是固定的。例如，太阳总辐射与大气二氧化碳含量都不是固定不变的，但是它们的时间波动及其空间震动通常比较小，因此在模型运行过程中通常可以忽略不计。真正被称之为控制参数的是一些经验参数，这些在模型公式中代表不同现象的经验参数却不能被模型直接决定。一些尚未解决的次级栅格尺度过程的参数化多数是通过基本的物理或统计假设而得到的经验参数，因此获取的值往往具有不确定性，所以又称之为调谐参数，如云团的形成或剧烈转移而产生混合长度的临界湿度阈值，则需要在模型的迭代输出运算和多次回归调整后，才有可能达到预期的结果。

主要参考文献

Berger A, Imbrie J, Hays J et al. 1984. Milankovitch and Climate. Understanding the Response to Astronomical Forcing. Part 1, NATO ASI Series-C: Mathematical and Physical Sciences. 126. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht

Boucher O. 1995. GCM Estimate of The Indirect Aerosol Forcing Using Satellite-Retrieved Cloud Droplet Effective Radii. J.Clim, 8, 1403~1409

Brunet G. 1994. Empirical Normal-Mode Analysis of Atmospheric Data. J Atmos. Sci., 51, 932~952

Kiehl J T, Trenberth K E 1997. Earth's Annual Global Mean Energy Budget. Bull.Amer.Meter.Soc., 78, 197~208

Mote P, O'Neil A(eds.). 2000. Numerical Modeling of the Global Atmosphere in the Climate System. 29~58. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands

Xue Y K. 1997. Biosphere Feedback on Regional Climate in Tropical North Africa. Quart. J. Roy. Meter. Soc., 123, 1483~1515

附录J IIASA人口模型

1. 模型概述

应用系统分析国际研究学会(IIASA)是位于奥地利维也纳附近的一个非政府行为的研究机构，它一直从事着全球变化人文尺度的环境、经济、技术及社会争议等一系列科研问题的内在机理研究。IIASA人口模型是IIASA研究的一个重要组成部分，其主要的研究焦点为：人口变量在社会经济发展与环境相互作用之间承担着什么样的角色，通过人口变量的改变会给社会经济发展与环境保护带来怎样的影响，以及如何通过控制人口变量使得社会经济发展与环境保护能够协调起来等一系列全球变化人文尺度方面所关心的重大问题。IIASA人口模型研究的主要方法是通过人口动态变化及其决定性因素的研究分析，进一步研究人口参数在远期尺度下对社会、经济、环境等因子的影响机制。这种人口与社会、经济、环境之间互动机制的分析既包括全球性的分析，也包括区域性的分析。为了更好地对在不同条件下的各种因子的互动机理进行研究，通常选择具有不同自然条件、不同社会经济条件的区域进行对比分析。

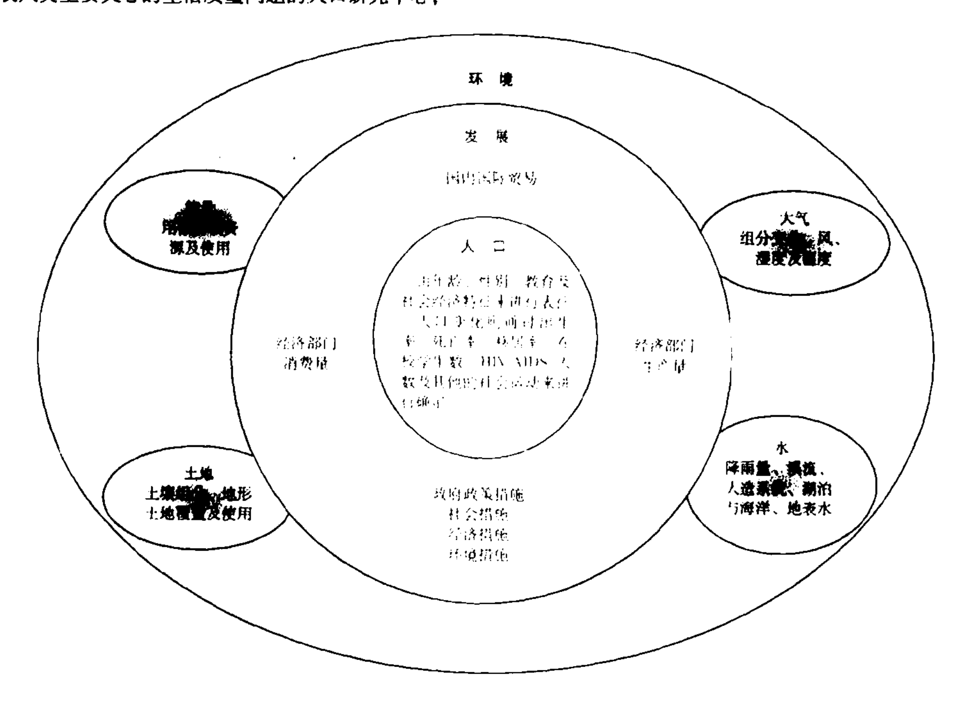
2. IIASA人口模型的研究目标与研究主题

IIASA人口模型研究小组不断地寻求更新的人口研究工程的研究方法。目前，应用IIASA人口模型研究结论的国家和地区越来越多，而且也纷纷支持他们在世界各地建立自己的统计机构。来自于人口年龄的研究挑战将是IIASA人口模型以后几年主要的研究重点之一，其应用性的研究内容既包括家庭关系与家庭赡养问题，也包括社会保障体系所关心的问题。从一个更加概念化的水平角度来说，IIASA人口模型的目标在于通过改进各种研究工作，而成为一个更加普遍应用的概念性人口平衡模型。此处的人口平衡模型研究应该包括同时隐含世界一部分区域人口快速增长而另一部分地区人口快速老龄化的综合性研究。通过对社会、经济与政治形式的观测之后，就会发现许多严重的问题与人口多少及年龄的分布密切相关，而与逐渐缩小的社会福利与私人权利则关系不大。人口平衡的这种解释，将有助于人口增长与年龄老化研究分析之间的概念性沟通。

在庞大而复杂的全球变化人文尺度研究内容当中，IIASA人口模型目前主要的研究主题包括以下四个方面的内容：① 随机性人口问题研究计划。它是一种由众多研究人员组成的人口工程研究方法，应用于IIASA人口计划研究的全部内容当中。以研究人口及其迁移为出发点，进而研究出生率与死亡率的时间变化，以及研究某个年龄阶段的移民与因受教育而发生的流动人口比率。当获得每一个研究周期内的以上各种比率，就可以获得人口及其年龄的动态分布情况，这远远超出早期点状数据的有效获取，但这也就使得人口分布呈现出随机分布状况。随机性人口问题研究的结论将有助于处于时空动态变化中的人口数量及其年龄构成的定量研究。② 人口老龄化及社会保障所面临的挑战研究。人口老龄化问题目前正在影响着后工业化国家的发展，它将对那些已经采取严格控制人口增长的欠发达国家的发展产生更严重的影响。现在人口老龄化高峰期还没有到来，是因为工业化国家庞大的生育人群仍然还出在生育高峰阶段，但可以肯定地预测在未来不长的时间里，人口老龄化问题将会越来越严重。POP研究项目与IIASA的社会保障改革项目进行联合研究，通过观测随机性人口问题研究计划最近的研究结果所隐含的人口年龄比率，从而对世界社会保障系统所需要的全球人口统计动态变化的隐含信息进行分析研究。其目的是重新设计社会保障系统以适应未来社会保障所面临的严峻挑战，它也是不确定性因子定量化研究的必要工作。③ 亚洲定倾中心人口可持续发展分析研究。大量的亚洲人口研究中心与应用系统分析国际研究学会合作建立起了基于定倾中心的国际性大型人口可持续发展分析组织，其关键的组成部分是目前已经发展起来的亚洲人口网络(APN)。④ 人口、发展与环境(PDE)案例研究。PDE模型分散于纳米比亚、博茨瓦纳与莫桑比克等国家的研究机构当中，并且已经得以实施和运行。PDE模型的研究目的是为了帮助政策决策者、赌金保管者、NGO、研究人员及其他能够看到未来消费的发展变化及选择模式可能性发展道路的人员。在IIASA研究组织的引导下，具有科学知识与政治背景的潜在用户已经开始紧紧地抓住使用PDE国家模型，并在各种选择性情景下运行使用。

3. PDE 模型的系统组成结构

PDE 模型(population, development and environment model) 是从 IIASA 人口模型研究中引申而来的人口-发展-环境综合研究模型。人口、发展、环境之间的内在机理与互动机制可用 PDE 模型复杂系统结构图来进行阐述和表达(附图 14)。在 PDE 模型中：P 代表人类主要关心的生活质量问题的人口研究中心；D 代表由人口及其活动所引发出来的人类能够进行解释和分析的经济发展与环境变化问题。因此，在系统结构图中人口问题也就相应地屈从于人为的环境问题，从而将中间层称之为发展层；根据 P 与 D 的解释和分析，E 代表的当然应该是由于人类生活的各种方式的涉入而引起的各种环境变化。环境问题归纳起来主要包括大气、水、土壤与能量等 4 个组成部分。



附图 14 PDE 模型的系统结构

4. PDE 模型的研究方法

PDE 模型的研究方法可以和综合评估方法相提并论，它不仅用孤立的方法对各个研究对象进行单独分析，而且研究如何将众多的研究对象综合在一起进行空间展示。PDE 研究方法比较清楚地显示了各个研究对象因子之间强大的互动关系与各种反馈流之间的系统关系。PDE 模型中的“综合”意味着其所获得的信息是由一系列的相关研究分析所集成而来的，而不是一个单独的规律性结论；PDE 模型中的“评估”同样意味着能够对复杂问题的相关性进行认知并为相关部门的决策者提供决策依据。诸如科学与政策对话、对复杂问题的认知管理等，PDE 模型的政策尺度研究所包括内容不仅是 PDE 研究方法的主要组成部分，也是 IIASA 研究学会长期进行相关研究的传统惯例。

PDE 模型系统动态模拟的研究方法为多种学科之间及学科内部之间进行交流与讨论提供平台奠定了基础。系统动态模拟企图定量分析具体问题的相互影响关系和定量分析多种问题之间的关联作用及其互动机理。对于目前比较复杂的系统来说，模型必须尽可能地减少模型变量或者将其简单化。由于资料数据可靠性和有效性原因，将模型变量进行简单化不但是必要的，而且可以使模型模拟运行变得更加容易理解和容易解释。此外，模型还必须设计一种方案使得用户界面更加透明和友好，以至于用户在不经过很长时期的软件训练就可以掌握模型不同的模拟情景。模拟的各种情景则是未来不同选择性蓝图的表征，未来的各种景象来自于智能模型的模拟运行，它反映着未来发展不同的远景目标。综合性的情景并不能对将来进行预测，它只是设计表示可能性未来各种情景相应的景象，

以及探索不同的输出成果，其研究分析方法介于定性分析与定量分析之间，而且试图保持这种基于两者之间的平衡关系。对于通过政治家、决策者、科学家及股份持有者等来检测各种假设情况的研究来说，这种研究方法是相当重要的。由于复杂模型设计模式的原因，模型中单个参数变量的改变都会在模型运行的过程中产生远远超出人们所假定或者所期待的运行结果。当然定性分析信息的综合也具有一定的局限性，比如说在定量研究与传统分析同时参与信息的收集和处理过程中就会经常出现矛盾。

5. PDE 模型的优势及缺陷

各种研究成果和研究经验表明，即使不是综合模型而是一个简单模型也能够为复杂问题和包含多种复杂现象的详细性模型提供引导性的帮助。PDE 模型的优势主要表现在以下几个方面：① 综合模型的主要优势在于模拟探讨各种相互作用和反馈信息；② 帮助证实具有不确定性和缺乏认知的各种复杂问题；③ 为复杂问题的信息传输提供很好的传输工具。另外一个方面，综合模型也存在着显而易见的缺陷。它主要表现在以下两个方面：① 大量具有不确定性且高度综合的信息数据的堆积与综合，使得模型的应用变得更加困难；②尽管模型模拟运行中选取哪些变量及如何选取、优化目标是什么及如何优化都是经过严格定义和分析而来的，但模型仍然依赖于大量的假设条件。

计算机动态仿真模型作为一种信息传输工具，它可以作为一个有用的翻译者来填补科学语言与政治语言之间的间隙，而 IIASA 的 PDE 模型一直承担着政策决策中的这一角色。研究经验表明，对于许多与政策相关的问题，计算机模拟短期效应产生的影响要比模拟长期效应所产生的影响严重得多。因此，具有特别友好的用户界面的计算机模型，更能够作为一种有用的工具来帮助用户进行以下工作：① 比较容易综合实际资料来对不同设想与选择的政策进行评估分析；② 模拟运行各种不同的情景；③ 对时间范围进行改变。因为通过时间范围的不同限制可以改变模型的模拟行为。不管模型的输出结果是图表还是线型表格，它都将易于理解和解释。

主要参考文献

Curran S, Kumar A, Lutz W, Williams M (eds.). 2002. Interactions Between Coastal and Marine Ecosystems and Human Population Systems. Special Issue of Ambio 31(4)

Lutz W, Scherbov S, Alexia Fürnkranz-Prskawetz et al. 2000. Population, Natural Resources and Food Security Lessons from Comparing Full and Reduced Form Models. International Institute for Applied Systems Analysis. Interim Report, IR-00-038Schlossplatz 1 • A-2361 Laxenburg • Austria E-mail: publications@iiasa.ac.at

Lutz W, Sanderson W, Scherbov S. 2001. The end of world population growth. Nature 412: 543-545

Lutz W, Prskawetz A, Sanderson WC (eds.). 2002. Population and Environment. Methods of Analysis. Supplement to Population and Development Review, Vol. 28, The Population Council, New York

O'Neill B C, MacKellar F L, Lutz W 2001. Population and Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK

Patricia P A A H, Kandelaars. 1997. A Dynamic Simulation Model of Tourism and Environment in the Yucatán Peninsula. Interim Report, IR-97-18/April E-mail: info@iiasa.ac.at

http://www.iiasa.ac.at

附录K 袖珍型气候评估模型(MiniCAM)

1. 模型概述

近年来，袖珍型气候评估模型(the mini climate assessment model、MiniCAM)发展较为迅速，它和ERB模型(Edmonds et al. 1994, 1996a)及ALM模型(Edmonds et al. 1996b)综合在一起，便可以对全球温室气体排放进行评估。该模型利用MAGICC模型(Wigley and Raper 1993)来估计气候变化，利用SCENGEN工具(Hulme et al. 1995)来模拟区域气候改变，利用(Manne、Richels和Mendelsohn)损伤功能来检验气候变化带来的负面影响。太平洋西北实验室的全球变化工作组创造的袖珍型气候评估模型目前正在蓬勃地向前发展，最近研究主要涉及农业土地利用模式的增加和估计所有东京气体排放的能力。

2. 模型应用的研究区域

目前，MiniCAM模型主要应用的研究区域包括以下11个地区：美国、加拿大、西欧、日本、澳大利亚、东欧、前苏联、中亚、中东、非洲、拉丁美洲以及南亚和东亚，几乎遍及世界的每个角落。大约有14个版本已基本完成。

3. 模型研究的宏观经济活动层次

MiniCAM模型直接将人口和劳动生产力过程相乘来估计集体劳动力生产水平。在能量价格中利用GNP/能量弹性系数来校准最终的GNP值。为了模拟现状，及对新人口情景的潜在影响有一个更确切的理解，它建立了一个扩展的经济活动水平过程模型。首先，通过一个详细的年龄金字塔结构模式来计算工作的人口数；再次，加入劳动力投入比例来评估劳动力；最后，生成一个外部发展结论来评估劳动生产增长率的长期发展状况。

4. 模型研究的能量部门

ERB模型是一个空间均衡模型，主要用来为煤、石油、天然气、核能、水能、太阳能、生物能等7个主要类别能量的供需平衡价格进行模拟评估。

(1) 能量需求

初始的能量需求模块被作为一个价格与收入函数，用以评估居民/商业、工业、交通等能量服务功能类别的需求量。能量服务功能主要由4个二级的燃料资源来进行提供，它们分别是固体燃料、液体燃料、天然气与电能。二级燃料能源的需求量主要依赖于各种燃料的相关成本和最终能量利用效率所体现的能量使用技术的演变情况。初级燃料的需求量则主要由其转化为二级燃料的转化成本决定。像核能、太阳能、水能等初级能源，通过电力部门就可以直接对其进行利用，然而煤与生物燃料则必须转化为气体燃料或液体燃料才能够加以利用。如果其转化成本过于昂贵，那么将大大影响其产出量，从而因为成本较高使得需求量下降。在目前的ERB模型中已经将氢气燃料考虑进去，它是由天然气与石油提炼而成的，能够用于发电或者直接为3个终端的需求部门提供二级燃料资源。

(2) 能量供给

能量供给部门不仅提供水能、太阳能和生物能等可再生能量资源，而且还提供煤、石油、天然气、核能等不可再生的能量资源。化石燃料资源的成本与资源等级、包括生产技术与生产环境的生产成本、历史生产能力等因素密切相关。引入化石燃料的资源等级，是为了让ERB模型能够明确地对化石燃料资源约束条件的重要性进行检测，以及为了表征页岩油类、甲烷等非传统燃料资源。目前，需要比较低的成本就可以利用的非传统燃料资源数量很少，而需要高成本或需要很高的转化技术才可加以利用的潜在性传统燃料资源数量很多。作为每一种电能生产的技术变化系数来说，初级燃料生产与转化的有效性可以用技术变化而引起的燃料具体变化比率来加以衡量和计算。

5. 模型研究的农业部门

MiniCAM模型的农业部门研究中，由农业部门提供的生物能是农业、林业部门与土地利用模块、能量模块之间进行关联的枢纽。ALM模型对每一个研究区域内农作物生产、放牧、林业生产、现代生物能的获取等5种土地利用用途的土地类型分布进行评估。每一种土地利用的分布反映了其用途的相对收益情况。收益情况则通过农作物价格、牲畜价格、林业产品及生物能量价格来进行测算，它反映了每一种产品的区

域性需求与供给情况。在 ALM 模型中有单独的农作物生产技术变化弹性系数、单独的牲畜产量及放牧技术变化弹性系数、单独的林业技术变化弹性系数以及单独的现代生物能生产技术变化弹性系数。

6. 模型研究的气体排放

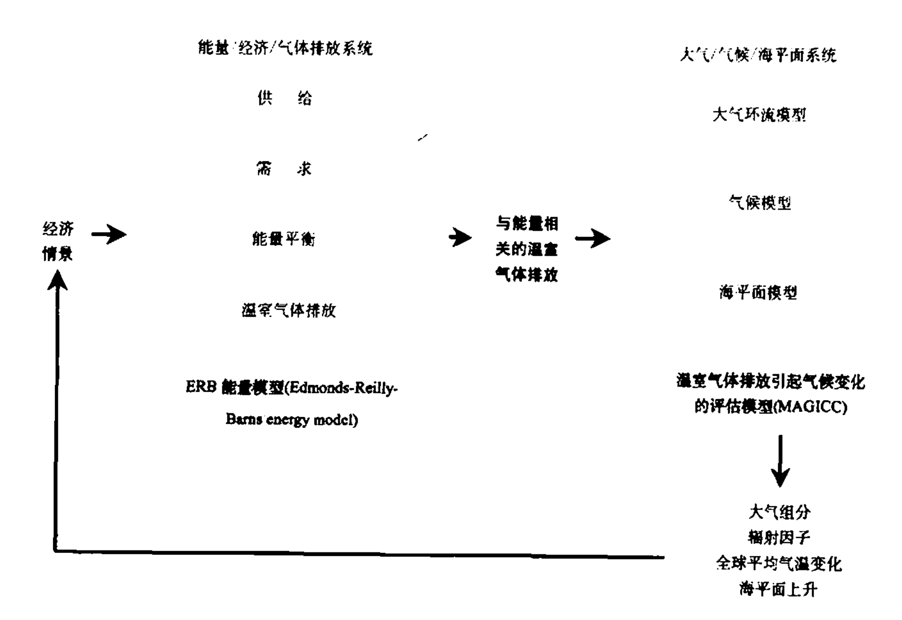
在 MiniCAM 模型的运行过程中，一旦模型达到某个周期内的平衡状态，温室气体的排放量就可以被计算出来。对于能量来说，CO_2、CH_4 和 N_2O 的排放量反映了所利用的化石燃料类型。而对农业生产过程中所排放的气体来说，反映的则是土地利用的土地变化情况、施肥情况和牲畜生产类型情况。高排放量的 GWP 气体(譬如，CFC 类气体、HCFC 类气体、HFC 类气体与 PFC 类气体的排放)只能够通过其类别来进行评估，而不能根据它们单个的组成部分进行评估。含硫气体的排放情况被作为化石燃料功能来进行评估，它所反映的含硫气体排放的控制效率则用 Kuznets 曲线人均收入的相关控制水平来进行测度。

7. 模型研究的气候变化及其影响

将各种气体排放的评估综合到全球水平上，然后将各种评估数据输入 MAGICC 模型中进行模拟运行，从而对温室气体浓度、辐射强度变化及相应的全球平均气温变化等进行评估分析。全球平均气温变化的评估结果在气候变化模式中作为 SCENGEN 工具运行的驱动因子，进一步输出气温区域性变化、降雨量变化及云的覆盖度等相关结果。最后，利用气温区域性变化的评估结果对市场与非市场的基础性损害进行评估。在 MiniCAM 模型中开发区域性损害函数是为了对区域性的更大损害进行评估，而不是为了区域的发展，它反映了低人均收入地区的气候环境存在着高度的脆弱性。

8. MiniCAM 模型的组成及系统结构

MiniCAM 模型包括两个子模型，分别是 ERB 模型(the Edmonds-Reilly-Barns energy model)和 MAGICC 模型(the model for the assessment of Greenhouse -Gas induced climate change)。ERB 模型最初是由 Oak Ridge 国家实验室研发的能量模型，它是早期 ERM 模型(Edmonds-Reilly model)改版，而 MAGICC 模型则是由全球气候变化研究机构研发的气候评估模型。MiniCAM 模型的技术性信息由模型研发者所提供的信息和模型许可复制的人员所提供的信息共同构成。能量和温室气体的相关问题用 ERB 模型来进行处理，而与大气组成、辐射强度、全球气温变化及海平面上升等相关问题的研究则用 MAGICC 模型。通过 MAGICC 模型参数的调节来运行各种温室气体排放变化的灵敏度，就可以对各种温室气体排放情景所隐含的信息进行比较分析。MiniCAM 模型的系统结构可用附图 15 进行表示。



附图 15　MiniCAM 模型的系统结构

主要参考文献

Edmonds J, Wise M, MacCracken C. 1994. Advanced Energy Technologies and Climate Change: An Analysis Using the Global Change Assessment Model (GCAM). PNL-9798, UC-402. Pacific Northwest Laboratory, Richland, WA 99352

Edmonds J, Wise M, Pitcher H, Richels R, Wigley T, MacCracken C. 1996a. An Integrated Assessment of Climate Change and the Accelerated Introduction of Advanced Energy Technologies: An Application of MiniCAM 1.0. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 1(4):311-339

Edmonds J, Wise M, Sands R, Brown R, Kheshgi H. 1996b. Agriculture, Land-Use, and Commercial Biomass Energy: A Preliminary Integrated Analysis of the Potential Role of Biomass Energy for Reducing Future Greenhouse Related Emissions. PNNL-11155. Pacific Northwest National Laboratories, Washington DC

Hulme M, Jiang T, Wigley T. 1995. SCENGEN: A Climate Change SCENario GENerator: Software User Manual, Version 1.0. Climate Change Research Unit, School of Environmental Sciences, University of East Anglia, Norwich, United Kingdom, 38pp

Manne AS, Mendelsohn R, Richels R. 1995. MERGE – A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies. Energy Policy, 23(1):17-34

Wigley T M L, Raper S C B. 1993. Future Changes in Global-Mean Temperatue and Sea Level. In: Warrick RA, Barrow E, Wigley T M L (eds.).Climate and Sea Level Change: Observations, Projections and Implications, pp.111-133. Cambridge University Press, Cambridge, 424pp

附录L　城市环境容量集成模型

城市化是国家发展阶段经济变化的必然结果。城市化促进了经济的发展。它与工业化和商业化相辅相成，它有利于提高生产力和增加就业机会，它使人们更易于接近各种生产要素、市场和其他基础设施。因此，城市化可以提高国民收入、改变生活方式、提高服务质量、使人民生活更加舒适。然而，无控制和没有计划的城市化会对城市生态环境和居民产生严重的负面影响。过大的城市人口密度会使城市基础设施和服务系统严重超载、生态环境严重破坏、城市生活质量恶化、社会不安定因素增加。

虽然大城市在我国的国民经济中发挥着“龙头”的作用，但城市人口的迅速增长正在使一些城市环境退化和自然资源使用过度。城市化做好了，对社会经济贡献巨大；反之，不仅造成巨大浪费，而且有些损失和负面影响难以弥补。也就是说，考虑到我国人口多、农村规模大、资源有限、生态环境不理想等因素，城市化水平低了不行，太高也不现实。因此，在我国已经或正在进入城市化加速阶段的形势下，城市环境容量研究势在必行。城市环境容量可定义为在不损害生态系统的条件下，城市地区单位面积上所能承受的资源最大消耗率和废物最大排放量。

环境容量于20 世纪 70 年代末引入我国后，在环境科学界迅速得到了广泛应用，并被纳入“六五”科技攻关。但当时将环境容量定义为某环境单元所允许承纳污染物质的最大数量，并将环境容量区分为水环境容量、大气环境容量和土壤环境容量。也就是说，这一时期的环境容量概念仅局限于环境污染局部问题。新一代环境容量集成模型研究需要吸收当前城市模型的社会经济方面和以往环境容量模型的污染方面，需要借助地理信息系统和遥感等先进的计算机软件和技术，建立集成社会经济系统和自然系统及其相互作用各个方面的环境容量时空动态模型。

1. 模型的集成背景

(1) 城市化对气候的影响

位于自然景观中的城市会对区域气候产生较大的影响。城市的自然结构、人造能量和污染排放、气候因素等的相互作用产生了特殊的城市气候。城市地区对气候产生影响的原因至少有 5 种：① 草、农田和树木被沥青、混凝土和玻璃代替；② 树和灌木的柔和、圆满外形被建筑物的生硬和块状结构代替；③ 建筑、空调、工业和汽车释放人造热；④ 排水系统对降水的有效处理阻碍了地表入渗；⑤ 各种污染物的排放。城市对气候的影响可通过与农村地区比较以下 6 个指标来量度。它们是温度(包括年均气温、冬天最低温度和夏天最高温度)、相对湿度(包括年均相对湿度、冬天相对湿度和夏天相对湿度)、云雾(包括云量、冬天雾和夏天雾)、太阳辐射(包括地平线表面总太阳辐射、冬天紫外线辐射、夏天紫外线辐射和日照时数)、风速(包括年均风速、狂风风速和无风)和降雨量(包括降雨量、雷暴和降雪量)。

(2) 城市化对水系统的影响

城区的人类活动改变了地表的原始面貌，对土地和水系统产生了非常大的影响。城市中的土地被沉积在地表的污染物质污染。小的颗粒物质和可浮动的废物被城市地表径流带入排水道；工业放射性废物进入土壤；大批非法倾倒的垃圾和废弃的汽车需要大量的清除劳动；大量的固体生活垃圾和工业废物必须被搬运到垃圾场、埋入地下或高温焚烧。它们污染了水的供给源，严重地影响了水生植物和水生动物的饮食系统，各种毒素在食物链中的生物积聚给人类健康带来了严重问题。

被建成的建筑物、马路、柏油停车场密封了大部分城区地面，它干扰了正常的水分循环过程。水分不是渗入土壤和通过植物蒸发，而是通过排水系统迅速地将它们排放到现存的水系。因为人们的各种活动常常使区域表面很脏，这种水的排放过程就改变了有关水系的质量，污染了河床、水道入口、河口、泻湖、湿地和近海滨环境。

由于区域降雨量增加，蒸发量、蒸腾作用和植被拦截降雨减少，再加上穿过石板、瓦管、下水道、道路、排水沟和排洪系统的有效运动，不但地表径流的流量大大增加，流速也必然增高。因此，城市化使水灾更频繁、洪峰更高，这就更进一步增加了洪灾的风险和对洪泛区附近居民的威胁。

(3) 城市化对空气质量的影响

城市空气受到了由许多污染源排放出的各种污染物的污染。这些污染物进入大气以后，就会相互发生

化学反应及与自然的大气元素发生化学反应，并因此产生其他污染物，在特殊的气象条件下，污染会增长到影响居民健康的水平。城市空气中的污染物也可能被顺风带到数千公里以外的农村地区，影响那里的空气质量。

城市大气中有大约几千种空气污染物，它们中的绝大多数的浓度很小。大多数空气污染研究和监测一般都集中于对人类健康和城市生活质量带来严重影响的几种主要污染物。空气污染物包括直接从污染源排放到空气中的一代污染物和一代污染物与大气元素通过化学反应产生的二代污染物。主要污染源包括：①工业区，电厂和炼油厂；② 以汽油和柴油为动力的各种车辆，包括汽车和飞机；③ 港口活动，包括大船、渔船和娱乐艇的排放物以及码头的装卸活动；④ 居民区；⑤ 矿物储备，裸露的土壤和未铺的公路；⑥ 其他污染源，例如，加油站、燃料储存区和商业区等。

城市中的空气被地表污染源污染。废气、颗粒物质和废热被添加到空气中，改变了气候和气象条件，通过化学反应又会产生光化学烟雾和酸雨等。随污染源位置、盛行大气系统和当地地形的不同，它们对人体健康、植物、动物和建筑都产生着不同程度的负面影响。

(4) 城市化对生物系统的影响

城市化改变了许多天然动、植物物种的平衡。虽然城市化对部分物种会产生正面影响，但它对大多数物种产生了负面影响，使许多物种变得稀少，甚至濒临灭绝。这些负面影响源于生境的清除和破碎、营养富集、水分循环的改变、环境污染和新的动、植物种的大量引进。

随着城市人口的增加，大量的动、植物种被有意或无意地引入城市。有计划引进的物种主要包括作物、树木、草和牲畜。牲畜被置于城市边缘或城市以外的地方，而装饰性的植物和家养的玩赏动物被有意地引入城市。同时，许多物种被无意中带进城市，它们中的部分物种对人类是有害的。也就是说，在过去的大多数情况下，城市化的后果是：① 清除掉了天然的植物，以单一的作物或树种代之；② 富有哺乳动物、鸟、爬行动物和昆虫的动物区系被人类及其家养的玩赏动物和许多意想不到的害虫、有害动物所代替，它往往会引起疾病和卫生问题；③ 城市里的动物生物量显著增加，而多样性减小；④ 如果天然草地被水养的城市林园所代替，则植物生物量增加，如果天然林区被草坪代替，生物量减小。

城市化使大片的植物生境变得支离破碎，成为城市化海洋中的一系列小岛屿，它减少了植物和动物种群繁殖的机会。城市中这些小天然生境岛屿面临的问题使基因库越来越小。同时，由于外部不利环境的影响，使得这些植物种群非常脆弱。根据岛屿生物地理学理论，离其他岛屿足够近的较大岛屿有利于物种的生存；同时，岛屿的形状也是一个很重要的方面，也就是说，形状越接近于圆或正六边形，越有利于自然生态系统内部的调控和反馈机制。然而，以往的大多数城市规划对绿色岛屿的形状没有给予足够的重视。

2. 集成模型的系统结构

虽然已有许多城市模型研究集中于城市的系统动态，但大多数可操作的城市模型聚焦于诸如住房供给、就业机会、土地利用、交通运输的很少几个子系统，考虑了几个有限的影响城市动态的要素。这些模型对人类活动空间分布的预测基于简单的空间相互作用机制和经济原理，没有系统全面地描述城市与环境过程的相互作用。目前，已有的城市模型按照其使用的理论方法可区分为六类：① 模拟人口、就业机会、服务和土地利用的最大熵模型；② 基于人口、就业机会、可接近性、地租和土地市场清算的市场经济模型；③集成住宅、职业和交通选择的优化模型；④ 包括商品、服务和劳动力等生产和消费要素的投入产出模型；⑤分析交通、就业和居住等家庭和商业特征的微观模拟模型；⑥ 基于简单几何过程的模拟城市变化的元胞推理机模型

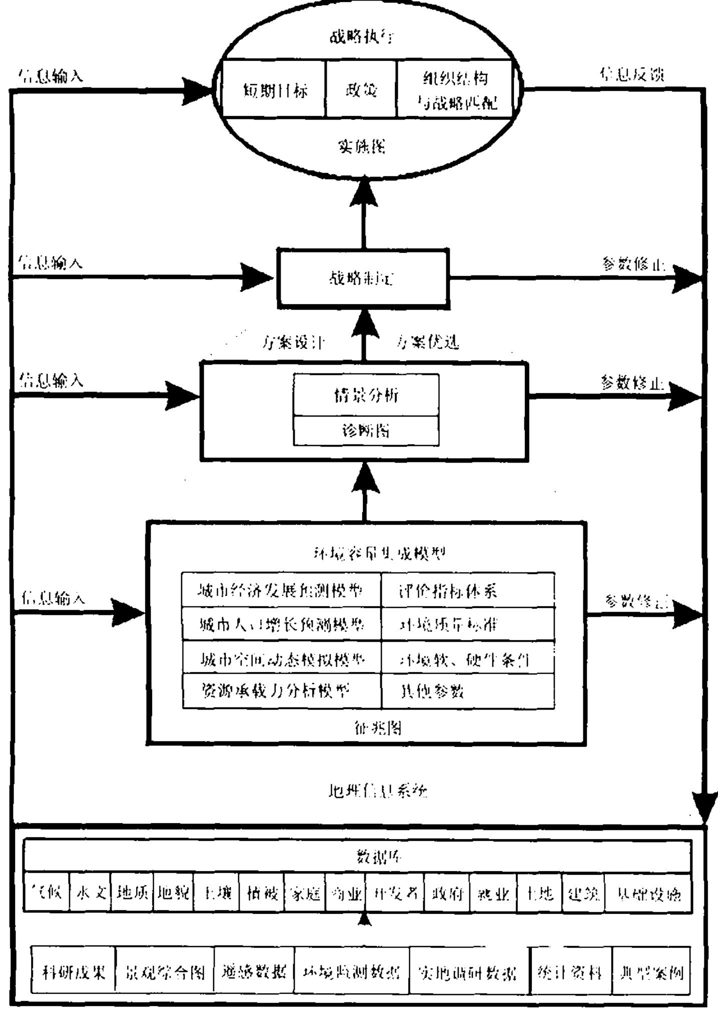
21 世纪城市化集成模型的首要任务是应用信息技术提高信息的生产力，解决决策中的结构和复杂性问题。人类对其赖以生存的地球已经进行了许多研究，积累了大量资料；与此同时，各种高、中、低轨道相结合，大、中、小卫星相互协同，高、中、低分辨率互补的全球对地观测系统，将能快速、及时地提供多种空间分辨率、时间分辨率和光谱分辨率的对地观测海量数据。有关研究表明，收集的数据数量每年将成倍增长。但主要由于没有将这些不同来源、不同类型和不同分辨率的资源环境巨量数据进行归纳、没有将局部的与整体的、乃至全球的数据进行综合分析，这些资料和数据没有转变为人们容易理解的信息，没有得到充分的利用。

目前，对巨量数据进行归纳的主要手段是建立指标体系。世界资源研究所(World Resource Institute)的研究结果表明，成功指标体系的特点之一就是只包含不多几个信息高度聚集的指标。据此，本文将城市化集成模型的指标体系(子模型体系)(详见附图16)浓缩为以下 6 个方面。

(1) 城市经济发展预测

工业化和工业现代化是 20 世纪经济发展的主旋律、城市化和城市现代化是现代社会进步的主旋律，工业化是城市化的经济内容、城市化是工业化的空间落实、工业化和城市化的相互促进与协调发展是现代

经济社会健康发展的重要标志。经济发展预测主要包括经济增长和产业结构两个方面。



附图16 城市环境容量集成模型

(2) 城市人口增长预测

城市化首先表现为城市人口的增长。由于乡村向城市的转化、人口由乡村向城市的转移，以及城市自身人口的增长，城市人口呈现出不断上升的趋势。这是城市化的一个最基本特征。

(3) 城市空间动态模拟

城市空间增长和空间格局的演变是城市化扩展的体现，有效地预测和模拟城市空间动态是城市环境容量评估与预测的一个非常重要方面。城市空间动态是在城市经济发展和城市人口增长驱动下，城市各种要素空间相互作用的结果。

(4) 资源承载力分析

主要内容包括就业、住宅和非住宅建筑、交通运输、能源供应、水供应和废水处理基础设施等人文资源承载能力以及自然资源承载能力。

(5) 环境质量标准

按照国际21世纪国际化大都市的标准，建立水环境质量标准、空气环境质量标准、区域环境噪声污染标准、绿地标准和热岛效应等气候异常标准，这些标准是环境容量模型的重要参数。

(6) 环境软、硬件条件

包括公民的环境意识、居民的富裕程度和政府的政策措施以及水污染、大气污染、固体污染物和噪音、放射污染的处理和防护设施，它们是城市现代化的主

要内容，是量度城市化的重要参数。

这里应当说明的是，这些指标体系没有包含各指标之间相互作用和相互关联的信息，只是城市化集成模型的组成部分。城市生态系统是一个社会、经济、自然相互作用的复杂系统。因为社会经济系统和自然系统的相互作用发生在各个不同的时间和空间尺度，人类决策和环境影响的时间差和人类活动环境影响的空间分异使人们认识这些相互作用的尝试都变得更加复杂。因此，模拟城市生态系统的行为不仅要详细地考虑这些子系统的时空动态，而且必须注意各种过程在不同时间和空间尺度起作用的连贯性。也就是说，在社会经济系统和自然系统相互作用的建模研究中，必须考虑许多因素同时在各个层次发生作用的复杂性和非线性，不能简单地对有关因素进行线性模拟。

城市化集成模型需要突出三大特点：① 针对各个城市生态系统的特点建立具体的城市环境容量集成模型，在大量案例研究的过程中，发展通用的城市环境容量集成模型；② 在地理信息系统的支持下，达到城市生态系统的全数字化和定量化；③ 在遥感技术集成服务体系的支持下，监测城市生态系统及其近邻地区的变化动态。

3. 模型运行分析

城市生态系统可概括为社会经济系统和自然系统及其相互影响。社会经济系统包括就业、土地、住宅和非住宅建筑、交通运输、能源、水供应、废水处理基础设施以及家庭、商业、开发者和政府，它们直接或间接地通过土地利用与土地覆盖变化、资源使用和废物排放影响自然系统。自然系统包括气候、地形、水文、植被、土壤、湿地。城市发展是生态系统结构的主要决定因素，它通过土地利用与土地覆被变化、自然资源利用和污染与废物排放对自然生态系统功能产生重大影响；人口增长和人类活动是城市生态系统动态的主要驱动力；气候、地形、水文、土地覆被和环境质量等自然环境因素是城市系统的重要限制因素。有关研究成果表明，当城市人口密度越过临界值0.788K 时(其中 K 为最大人口承载能力，是可持续发展意义上单位面积允许承载的最大人口数量)，环境影响超过了自然系统消除或消散干扰的能力，对重要的生态功能就会产生不可挽回的损害；当人口密度小于这个临界值时，城市生态系统可以吸收干扰而对生态系统结构和功能不产生损害性影响。

主要参考文献

岳天祥. 2001. 城市环境容量集成模型研究. 地球信息科学, 3(4): 30~33

(X-0082.0101)

ISBN 7-03-011436-1



［Ｇｅｎｅｒａｌ　Ｉｎｆｏｒｍａｔｉｏｎ］
书名＝资源环境数学模型手册
作者＝岳天祥主编
页数＝８９８
ＳＳ号＝１１１２０３３３
出版日期＝２００３年１０月第１版
出版社＝科学出版社
尺寸＝３０ｃｍ
原书定价＝２００．００
主题词＝自然资源（学科：　环境数学　学科：　数学模型）自然资源　环境数学　数学模型
参考文献格式＝岳天祥主编．资源环境数学模型手册．北京市：科学出版社，２００３．
内容提要＝中国科学院知识创新工程项目（ＫＺＣＸ２－３０８）　国家重点基础研究发展“９７３”规划项目（２００２ＣＢ４１２５００）：本书在全面总结和分析国内外资源环境领域主要信息的基础上，精心选编出实用性强和具有科学价值的数学模型和定量指标一共３０５５组。